

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407905

光谱补偿下白光 LED 系统的色温模型及调光控制*

沈雪华¹ 陈焕庭² 石为人³ 吴 芮¹ 叶选成¹

(1. 广州航海学院智能制造学院 广州 510725; 2. 闽南师范大学物理与信息工程学院 漳州 363000;

3. 深圳市人工智能与机器人研究院 深圳 518129)

摘 要: 荧光型白光 LED 的光谱结构相对固定, 蓝光成分偏多, 红光和绿光成分偏少, 相关色温不易调整且普遍较高, 同时显色特性亦存在不足。针对荧光型白光 LED, 通过光谱补偿的方式构建了可调白光 LED 系统, 提高了光谱在可见光范围内的连续性和均匀性, 在实现混合光谱相关色温可调的同时改善了显色特性。结合 LED 器件的光电热特性分析, 建立了混合光谱相关色温的非线性关系模型, 可根据系统的电驱动状态快速预测混合光谱的相关色温, 并可针对目标色温进行反向的驱动控制。经实验验证, 所建立的非线性关系模型能够准确预测混合光谱的相关色温, 误差不超过 4.5%。而在针对目标色温的调光控制方面, 混合光谱相关色温的调节误差不超过 1.5%, 且显色指数的提升率均超过 5%, 最高达到 18.51%。由此表明, 对荧光型白光 LED 进行光谱补偿可以有效改善光谱结构, 实现高显色特性下的调光控制, 提高照明品质和适用性。

关键词: 发光二极管; LED 照明光源; 光谱补偿; 动态照明

中图分类号: TH741; TN383

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.20

Correlated color temperature model and dimming control of white LED system based on spectral compensation

Shen Xuehua¹ Chen Huanting² Shi Weiren³ Wu Rui¹ Ye Xuancheng¹

(1. College of Intelligent Manufacturing, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China; 2. School of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China; 3. Shenzhen Institute of Artificial Intelligence and Robotics for Society, Shenzhen 518129, China)

Abstract: Phosphor-converted (PC) white LEDs have relative fixed spectral structures, with much blue spectrum but less red and green components. As a result, their correlated color temperature (CCT) is difficult to adjust and generally high, accompanied by an insufficient color rendering index (CRI). For this reason, tunable white LED systems are constructed based on spectral compensation, which improves the spectral continuity and uniformity in the visible light range, thus to obtain the dynamic tunability of CCT and enhancement of CRI. Combined with the photo-electro-thermal characteristics analysis of LED devices, a nonlinear dynamic relationship model of CCT is established. This model allows for quick prediction of CCT for the mixed spectra under given electric driving states, and in reverse enabling driving control according to target CCTs. In verified experiments, the nonlinear dynamic relationship model of CCT can accurately predict CCTs with errors of no more than 4.5%. In terms of dimming for target CCTs, errors between actual CCTs and their target ones are less than 1.5%, with CRI upgrade rates exceeding 5% and even reaching up to 18.51%. All the experiment results suggest that spectral compensation is a feasible approach to optimize the spectral structure of PC white LEDs, in this way to achieve dimming control with an enhanced CRI, effectively improving lighting quality and applicability.

Keywords: light-emitting diode; LED light sources; spectral compensation; dynamic lighting

收稿日期: 2024-10-20 Received Date: 2024-10-20

* 基金项目: 国家自然科学基金 (62001200)、广州市基础 research 计划 (SL2024A04J01939)、福建省高校产学研合作项目 (2024H6014, 2022G02006) 资助

0 引言

光照给人类提供了观察世界、感知环境的视觉条件,当前人工照明几乎渗透人类活动的各个角落。发光二极管(Light emitting diode, LED)因高效耐用、节能环保、色彩丰富等优势,逐渐取代白炽灯、荧光灯等传统光源,成为新一代通用照明领域的主流^[1-2]。而照明环境不仅创造视觉效果,也影响着居住者的情绪状态、主观感受和工作效率,甚至健康状况^[3-5]。在视觉效果上,相关色温(correlated color temperature, CCT)和显色指数(color rendering index, CRI)是光源质量评价的关键性指标,尤其就室内照明而言。研究表明,在办公室和会议厅等工作区,高 CCT 值光源能够提供更高亮度水平,有助于改善人的主观感知和思维能力;在卧室和休息间等区域,较低 CCT 值光源易于营造舒适温馨氛围,有利于促进身心放松^[6]。CRI 则主要用于描述物体在特定光源下所呈现颜色的自然程度^[7],表明光源对物体色彩的还原能力,其值介于 1~100 之间。通常以自然光(太阳光)的显色特性为标准,规定其 CRI 为 100^[8]。在需要对物体色彩进行正确判断的日常区域,一般建议照明光源的 CRI 不低于 80^[9];而在诸如博物馆和美术馆等对物体色彩对比度要求较高的场合,照明光源的 CRI 应在 90 以上^[10]。

荧光型白光 LED 由 GaN 基蓝光芯片和 YAG:Ce 荧光粉封装而成的,具有技术成熟、高效经济、光谱较宽等优点^[11]。由于光谱结构相对固定且蓝光成分较大,荧光型白光 LED 在单独使用时色温难以调整、CCT 值偏高。为获得色温可调的白光,文献[12]采用两个分别具有高 CCT 值和低 CCT 值的荧光型白光 LED 构成双通道 LED 系统,实现了混合白光 CCT 从前述低 CCT 值到高 CCT 值的连续变化。然而,因混合白光的色坐标仅能处于两个 LED 对应色坐标的连线之上,该系统的调光范围小、光色较单一。基于上述双通道白光 LED 系统结构,文献[13]通过非线性优化和双反馈回路,加强了对混合光谱的颜色控制。但受限于荧光型白光 LED 普遍存在的红绿光谱不足问题,所得混合光谱显色特性较差,大多 CRI 数值低于 65。文献[14]利用了红绿蓝三基色 LED 构成 RGB-LED 系统,能够独立控制三基色 LED 的运行状态调节混合光谱结构,实现对亮度和颜色的控制。然而,三基色 LED 单独出射的红光、绿光和蓝光均为窄光谱,三者叠加后在可见光范围内的连续性和均匀性较差,显色特性提升仍有困难^[15]。

在提高输出白光显色特性方面,相关学者也进行了研究探索。文献[16]在 YAG:Ce 荧光粉制备过程中,结合表面粗化处理、烧结硼酸磷玻璃层等操作,改善荧光粉层在蓝光激发下的光致发光特性,有效提高了光通量和

CRI。文献[17]基于荧光型白光 LED 的基本结构,在 YAG:Ce 荧光粉层中额外掺入红绿荧光粉颗粒,并通过调整荧光粉配置结构产生接近全光谱的白光,使得 CRI 大幅提高。然而通过制备高性能荧光粉或是掺入多色荧光粉的方式,虽然能够改善混合光谱的显色特性,但因荧光粉均固化于涂覆层中,无法单独控制某一种荧光粉转化的发射光谱,导致光谱色温不可调^[18]。另外,有学者提出在紫外或近紫外 LED 芯片上涂覆红绿蓝三基色荧光粉层,利用三基色荧光粉的光致发光特性产生兼具连续性和均匀性的宽光谱,达到较大幅度提升显色指数的目的^[19-20]。然而,该方法除了同样存在色温不可调问题之外,因光转换效率不高、潜在的紫外光泄露以及蓝色荧光粉制备困难等技术障碍,目前阶段实施较为困难^[21-22]。

综上所述,目前白光 LED 光源在实际应用中难以兼顾色温可调性和高显色特性实现较好的调光控制。为此,在荧光型白光 LED 基础上结合红光 LED 和绿光 LED 构建的可调白光 LED 系统,基于光谱补偿机制和补偿量变化对光谱结构进行调节,改善混合光谱的连续性和均匀性,具有色温可调和显色特性提升的双重优点。此外,结合 LED 器件的光电热特性和光谱光色分析,建立了混合光谱 CCT 的非线性关系模型,一方面可通过系统的电学驱动状态进行混合光谱 CCT 的快速预测,另一方面可根据目标 CCT 对系统运行进行反向的调光驱动控制。研究结果为 LED 照明光源的动态优化和调光控制提供了一定的参考。

1 荧光型白光 LED 的光谱结构及特性

根据荧光型白光 LED 的封装结构和工作原理,其出射光谱组成通常被认为两部分,一部分是 GaN 基蓝光 LED 芯片在电驱动下由内部载流子辐射复合而发射的初始蓝光,另一部分是 YAG:Ce 荧光粉在初始蓝光激发下由光致发光效应而产生的黄光^[23]。YAG:Ce 荧光粉的光致发光效应在激发和发射上的量子效率均较高,同时其发射波长的峰值正好位于人眼视觉函数的峰值附近,流明效率高。因此,将其涂覆于 GaN 基蓝光芯片构成的荧光型白光 LED 在发光效率上亦较高^[24-25]。

如图 1 所示,实线为典型的荧光型白光 LED 的光谱功率分布。其中,图 1(a)对应的白光 LED 出射光谱中含有较多蓝光成分,CCT 较高,整体光色呈现冷色调,称为冷白光 LED;图 1(b)对应的白光 LED 出射光谱中的蓝光成分比例较小,CCT 偏低,光照效果偏暖色调,称为暖白光 LED。对于荧光型白光 LED,由 GaN 基蓝光芯片的电致发光效应而激发的蓝光光谱和由 YAG:Ce 荧光粉层的光致发光效应而转化的黄光光谱将覆盖大部分可见光波段范围。图 1 中,三色高斯模型对荧光型白光 LED 的

光谱功率分布的拟合度达到了 0.99 以上。可见, YAG: Ce 荧光粉在蓝光激发下转化的黄光光谱实际上包含了少量的绿光或蓝绿光成分。

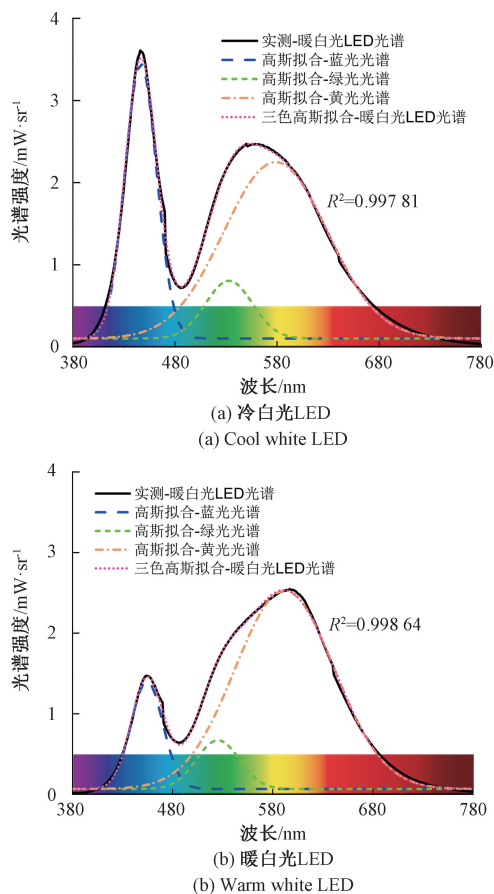


图 1 荧光型白光 LED 光谱功率分布及其拟合
Fig. 1 Spectral power distribution and the fitting of phosphor-converted white LEDs

根据光的三基色原理, 将红绿蓝三基色光谱按照一定方式混合即可得到白光。三基色光谱的成分比例决定了混合白光的光谱功率分布, 进而决定其光照性能, 如色温、色品坐标、显色特性等。在可见光范围内观察荧光型白光 LED 的光谱结构, 不难发现其输出光谱存在红光、绿光成分不足的问题。作为照明应用, 红光和绿光在白光光谱中尤为重要: 绿光占据了大约总光谱亮度的 69%, 且处于光谱波长色彩排列中心^[14]; 而缺少红光成分将导致光谱 CRI 偏低, CCT 偏高, 极大影响视觉效果^[17]。

为此, 研究中在荧光型白光 LED 出射光谱的基础上, 采取红绿光谱补偿的方式改善混合光谱结构, 提高显色特性, 并通过改变红绿光谱补偿量调节光谱结构及成分比例, 实现色温的调节, 以适应不同场景需求。考虑到荧光型白光 LED 出射光谱中的蓝光成分偏多, 过量的蓝光辐射会给人眼视网膜带来潜在危害。因此, 光谱补偿

过程中, 作为主体的荧光型白光 LED 的驱动状态将保持不变。图 2 所示为荧光型白光 LED 的出射光谱在叠加红绿光谱前后的光谱功率分布对比情况, 由图 2 可见, 在光谱补偿下, 总的混合光谱的连续性和均匀性均有所提高, 显色特性亦得到改善。

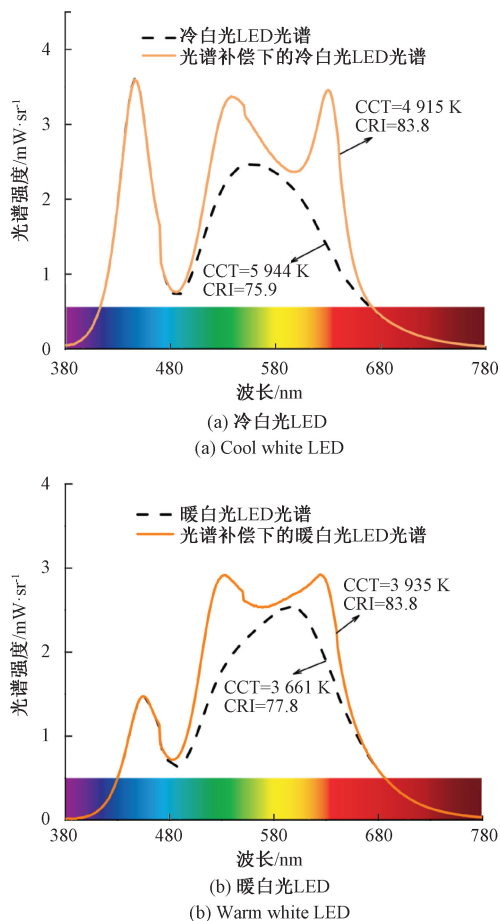


图 2 白光 LED 在光谱补偿前后的光谱特性对比
Fig. 2 Comparison of spectral characteristics before and after spectral compensation

2 光谱补偿下的相关色温预测模型

2.1 LED 光通量的电热特性分析

对于单个 LED 光源, 其光通量 Φ_v 与驱动功率之间存在关系如式(1)所示。

$$\Phi_v = EP_d \quad (1)$$

式中: E 和 P_d 分别为 LED 的发光效率和驱动功率。

受半导体材料温度敏感性及其 LED 器件封装结构的影响, LED 光源在输出光谱的同时将伴随热量产生过程^[26]。当 LED 器件内部热量无法及时传导时, 聚集的热量将引起温度升高, 导致输出光谱性能的衰退。LED 光源的这种热猝灭效应集中表现在其光视效能 E 的温度衰

减特性上^[27]。为保证良好光学性能,LED 器件及其系统通常要求在结温 125 ℃ 之下工作。在该运行温度范围内,LED 光视效能与温度的关系如式(2)所示。

$$E = E_0 [1 + k_e (T_j - T_0)] \quad (2)$$

式中: E_0 为在额定温度 T_0 (通常是 25℃) 下的额定发光效率; T_j 为 LED 结温; k_e 为 LED 发光效率跟随温度升高而降低的相对速率。

结合式(1)和(2)可知,对于所研究的光谱补偿下的白光 LED 系统,各 LED 的光通量可表示如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Phi_W = E_{W,0} [1 + k_{e,W} (T_{j,W} - T_0)] \\ \Phi_R = E_{R,0} [1 + k_{e,R} (T_{j,R} - T_0)] \\ \Phi_G = E_{G,0} [1 + k_{e,G} (T_{j,G} - T_0)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: Φ_W 、 Φ_R 和 Φ_G 分别为荧光型白光 LED、红光 LED 和绿光 LED 的光通量; $E_{W,0}$ 、 $E_{R,0}$ 和 $E_{G,0}$ 分别对应三者在额定温度下的额定发光效率; $k_{e,W}$ 、 $k_{e,R}$ 和 $k_{e,G}$ 分别对应三者发光效率跟随温度升高而降低的相对速率; $T_{j,W}$ 、 $T_{j,R}$ 和 $T_{j,G}$ 则分别对应三者的结温。

LED 结温与其热耗散特性有关^[26]。实际应用中,通常会在 LED 和散热装置之间使用散热复合材料或其他等效替代材料,以确保良好的热接触。通过合理的散热设计,LED 器件将处于热稳定状态,此时热导体或电绝缘体的热阻相比 LED 结热阻而言要小得多,在简化分析中可忽略不计^[28]。图 3 所示为所研究的基于光谱补偿作用的白光 LED 系统的结构示意图及其热稳态条件下的简化热耗散特性模型。

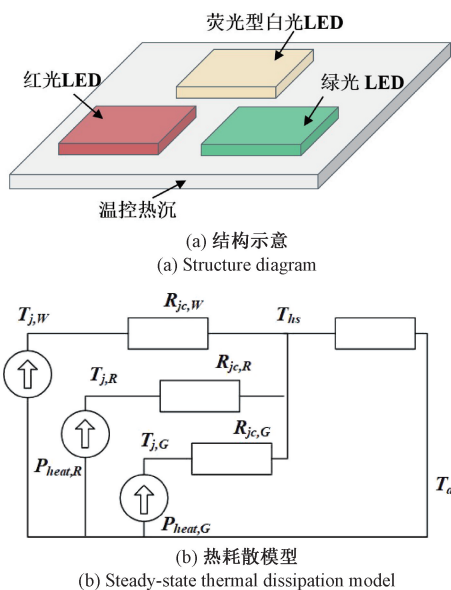


图3 白光 LED 系统结构及其热稳态热耗散模型

Fig. 3 Structure diagram and steady-state thermal dissipation model of the white LED system

沉热阻; $R_{jc,W}$ 、 $R_{jc,R}$ 和 $R_{jc,G}$ 分别为荧光型白光 LED、红光 LED 和绿光 LED 的结热阻; $P_{heat,W}$ 、 $P_{heat,R}$ 和 $P_{heat,G}$ 分别为荧光型白光 LED、红光 LED 和绿光 LED 的热耗散功率。根据该热耗散模型,进一步可得:

$$T_{hs} = T_a + R_{hs} (P_{heat,W} + P_{heat,R} + P_{heat,G}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_{j,W} = T_{hs} + R_{jc,W} P_{heat,W} \\ T_{j,R} = T_{hs} + R_{jc,R} P_{heat,R} \\ T_{j,G} = T_{hs} + R_{jc,G} P_{heat,G} \end{cases} \quad (5)$$

由于 LED 的热耗散热量 P_{heat} 与其热耗散系数 k_h 和驱动电功率 P_d 之间存在关系 $P_{heat} = k_h P_d$, 则系统中各 LED 的热耗散热量为:

$$\begin{cases} P_{heat,W} = k_{h,W} P_{d,W} \\ P_{heat,R} = k_{h,R} P_{d,R} \\ P_{heat,G} = k_{h,G} P_{d,G} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{d,W}$ 、 $P_{d,R}$ 和 $P_{d,G}$ 分别为荧光型白光 LED、红光 LED 和绿光 LED 的驱动功率; $k_{h,W}$ 、 $k_{h,R}$ 和 $k_{h,G}$ 分别对应各 LED 的热耗散系数,即各 LED 电功率转化为热量的比例。

将式(4)和(6)代入式(5)中,经整理可得各 LED 结温的表达式为:

$$\begin{cases} T_{j,W} = T_a + (R_{hs} + R_{jc,W}) k_{h,W} P_{d,W} + R_{hs} k_{h,R} P_{d,R} + R_{hs} k_{h,G} P_{d,G} \\ T_{j,R} = T_a + R_{hs} k_{h,W} P_{d,W} + (R_{hs} + R_{jc,R}) k_{h,R} P_{d,R} + R_{hs} k_{h,G} P_{d,G} \\ T_{j,G} = T_a + R_{hs} k_{h,W} P_{d,W} + R_{hs} k_{h,R} P_{d,R} + (R_{hs} + R_{jc,G}) k_{h,G} P_{d,G} \end{cases} \quad (7)$$

在热稳定驱动状态下,各 LED 的热耗散系数 k_h 、发光效率与温度的关系系数 k_e 以及结热阻 R_{jc} 均不发生显著变化^[29]。加之荧光型白光 LED 驱动状态保持不变,而光谱补偿作用是通过改变红绿 LED 的驱动状态实现的,故式(7)中除驱动功率 $P_{d,R}$ 和 $P_{d,G}$ 为变量之外,其他参数均视为常值。若将系统运行过程中红绿 LED 的驱动电压设置为定值,则由电功率、电压、电流三者关系可知,红绿 LED 的驱动功率 $P_{d,R}$ 和 $P_{d,G}$ 将表达为:

$$\begin{cases} P_{d,R} = V_{d,R} I_{d,R} \\ P_{d,G} = V_{d,G} I_{d,G} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $V_{d,R}$ 和 $V_{d,G}$ 分别为红光 LED 和绿光 LED 的驱动电压,为常值; $I_{d,R}$ 和 $I_{d,G}$ 分别为红光 LED 和绿光 LED 的驱动电流,为变量。

将式(7)和(8)代入式(3)中,整理可得各 LED 的光通量(Φ_W 、 Φ_R 、 Φ_G)与红绿 LED 驱动电流($I_{d,R}$ 、 $I_{d,G}$)具有如式(9)所示的函数关系。

$$\begin{cases} \Phi_W(I_{d,R}, I_{d,G}) = a_0 + a_1 I_{d,R} + a_2 I_{d,G} \\ \Phi_R(I_{d,R}, I_{d,G}) = b_1 I_{d,R} + b_2 I_{d,G} I_{d,R} + b_3 I_{d,R}^2 \\ \Phi_G(I_{d,R}, I_{d,G}) = c_1 I_{d,G} + c_2 I_{d,R} I_{d,G} + c_3 I_{d,G}^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:(a_0 、 a_1 、 a_2)、(b_1 、 b_2 、 b_3) 和 (c_1 、 c_2 、 c_3) 分别对应荧

图 3(b) 中, T_a 为环境温度; T_{hs} 为热沉温度; R_{hs} 为热

光型白光 LED、红光 LED 和绿光 LED 的独立光通量与红绿 LED 驱动电流的关系系数,且有:

$$\begin{cases} a_0 = E_{W,0} \{ [1 + k_{e,W}(T_a - T_0)] P_{d,W} + \\ k_{e,W} k_{h,W} (R_{hs} + R_{jc,W}) P_{d,W}^2 \} \\ a_1 = E_{W,0} k_{e,W} k_{h,R} R_{hs} P_{d,W} V_{d,R} \\ a_2 = E_{W,0} k_{e,W} k_{h,G} R_{hs} P_{d,W} V_{d,G} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} b_1 = E_{R,0} V_{d,R} [1 + k_{e,R}(T_a - T_0 + k_{h,W} R_{hs} P_{d,W})] \\ b_2 = E_{R,0} k_{e,R} k_{h,G} R_{hs} V_{d,R} V_{d,G} \\ b_3 = E_{R,0} k_{e,R} k_{h,R} V_{d,R}^2 (R_{hs} + R_{jc,R}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} c_1 = E_{G,0} V_{d,G} [1 + k_{e,G}(T_a - T_0 + k_{h,W} R_{hs} P_{d,W})] \\ c_2 = E_{G,0} k_{e,G} k_{h,R} R_{hs} V_{d,R} V_{d,G} \\ c_3 = E_{G,0} k_{e,G} k_{h,G} V_{d,G}^2 (R_{hs} + R_{jc,G}) \end{cases} \quad (12)$$

2.2 混合光谱相关色温的非线性分析与建模

照明光源的色品坐标、三刺激值、相关色温、光通量之间存在相互联系。光谱三刺激值(X, Y, Z)与色品坐标(x, y, z)关系如式(13)所示。

$$y_M = \frac{Y_M}{X_M + Y_M + Z_M} = \frac{Y_W + Y_R + Y_G}{X_W + X_R + X_G + Y_W + Y_R + Y_G + Z_W + Z_R + Z_G} = \frac{Y_W + Y_R + Y_G}{\frac{x_W}{y_W} Y_W + \frac{x_R}{y_R} Y_R + \frac{x_G}{y_G} Y_G + Y_W + Y_R + Y_G \frac{1 - x_W - y_W}{y_W} + \frac{1 - x_R - y_R}{y_R} Y_R + \frac{1 - x_G - y_G}{y_G} Y_G} = \frac{Y_W + Y_R + Y_G}{\frac{Y_W}{y_W} + \frac{Y_R}{y_R} + \frac{Y_G}{y_G}} \quad (16)$$

根据光源的光色特性,刺激值 Y 代表亮度,通常与光通量成比例,色品坐标 y 近似与 CCT 成比例。因此,式(16)可改写如式(17)所示。

$$CCT_M = \frac{\Phi_W + \Phi_R + \Phi_G}{\frac{\Phi_W}{CCT_W} + \frac{\Phi_R}{CCT_R} + \frac{\Phi_G}{CCT_G}} \quad (17)$$

式中: CCT_W 、 CCT_R 和 CCT_G 分别为荧光型白光 LED、红光 LED 和绿光 LED 的独立光谱的相关色温; CCT_M 为三者叠加后的混合光谱的相关色温。

综上所述,荧光型白光 LED 的驱动状态不变,则其单独点亮时 CCT_W 基本稳定。对于红绿光 LED 而言,虽然单独点亮时其出射光谱会随着驱动状态的变化而变化,但因二者均为窄光谱,驱动状态变化对其光色特性影响较小,对应的 CCT_R 和 CCT_G 亦基本不变。基于此,结合式(9)和(17)可知,进行光谱补偿后,混合光谱 CCT 将取决于红光 LED 和绿光 LED 的驱动电流。

在上述推导确定混合光谱 CCT 与红绿 LED 驱动电流之间存在函数关系基础上,进一步结合测试数据和数学拟合方法,确定其函数关系的具体形式。图 4 所示为

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases} \quad (13)$$

因为 $x+y+z=1$,由上式可得:

$$\begin{cases} Y = \frac{y}{x} X \\ Z = \frac{z}{x} X = \frac{1 - x - y}{x} X \end{cases} \quad (14)$$

假设荧光型白光 LED、红光 LED、绿光 LED 在单独点亮时的光谱三刺激值分别为(X_W, Y_W, Z_W)、(X_R, Y_R, Z_R)和(X_G, Y_G, Z_G),则三者叠加后得到的混合光谱的三刺激值(X_M, Y_M, Z_M)为:

$$\begin{cases} X_M = X_W + X_R + X_G \\ Y_M = Y_W + Y_R + Y_G \\ Z_M = Z_W + Z_R + Z_G \end{cases} \quad (15)$$

结合式(14)和(15)可得混合光谱的色品坐标 y_M 为:

光谱补偿后的混合光谱的 CCT 和 CRI 与红绿 LED 驱动电流的关系。

由图 4(a)可见,混合光谱 CCT 分别与红绿 LED 的驱动电流存在单调关系。当红光 LED 在固定电流驱动下,混合光谱 CCT 随着绿光 LED 驱动电流的增大而升高。当绿光 LED 在固定电流驱动下,混合光谱 CCT 则随着红光 LED 驱动电流的增大而降低。而观察图 4(b)可知,红光光谱的叠加有利于提高混合光谱的显色特性,但 CRI 是随着红光 LED 驱动电流的增大先提高后下降。这是因为红光补偿量较少时,补偿红光填补了原先光谱中的红光成分不足,使得混合光谱能量分布更加均匀,能够更为准确地还原物体颜色,提高显色特性^[14];而当红光补偿量超过一定值后,过量红光将会导致光谱能量分布失衡,并可能掩盖其他颜色光的贡献,影响了光谱对其他颜色的再现能力,反过来导致 CRI 降低^[17]。对于绿光光谱,其叠加量使得混合白光的 CRI 单调降低。在无红光补偿的情况下,无论是否进行绿光补偿,混合光谱的 CRI 均低于 80。由此进一步说明红光成分在光谱显色特性方面的重要作用。

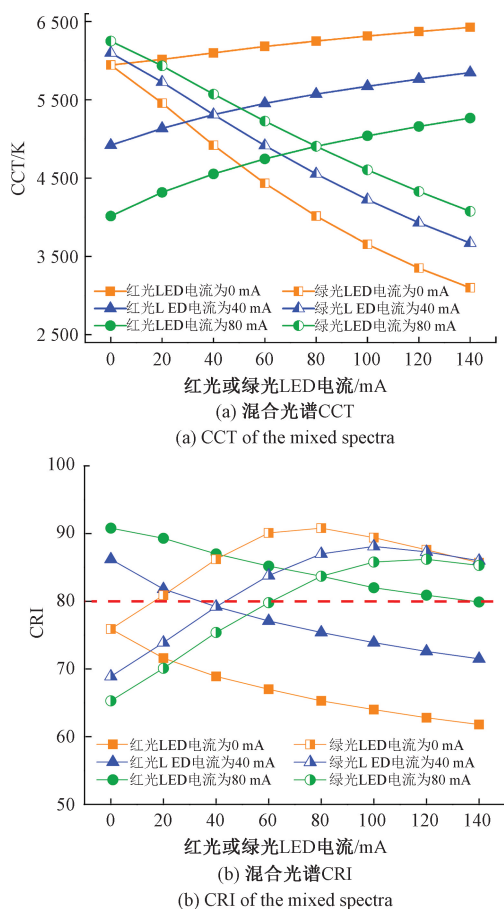


图4 混合光谱 CCT、CRI 与红光、绿光 LED 电流的关系

Fig. 4 Relationships between CCT and CRI of the mixed spectra versus currents of red and green LED

图4(a)中各混合光谱 CCT 曲线跟随红绿 LED 的驱动电流单调变化,且光滑度和连续性均较好。在综合权衡函数拟合的复杂度和准确性后,采用二次多项式描述混合光谱 CCT 与红绿 LED 驱动电流之间的关系,具体形式如式(18)所示。

$$\begin{cases} CCT_M(I_{d,R})|_{I_{d,G}=C} = \alpha_1 + \alpha_2 I_{d,R} + \alpha_3 I_{d,R}^2 \\ CCT_M(I_{d,G})|_{I_{d,R}=C} = \beta_1 + \beta_2 I_{d,G} + \beta_3 I_{d,G}^2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: C 表示常值; α_1 、 α_2 、 α_3 、 β_1 、 β_2 和 β_3 均为拟合系数,结合图4(a)曲线有 $\alpha_1 < 0$ 、 $\alpha_2 > 0$ 、 $\beta_1 > 0$ 、 $\beta_2 < 0$ 。

在对混合光谱 CCT 曲线的函数拟合中,拟合度均达到了 0.99 以上,表明二次多项式模型能够很好地描述混合光谱 CCT 在光谱补偿作用下的变化特性。

进一步地,可得混合光谱 CCT 与红绿 LED 驱动电流之间的二元非线性函数关系模型,如式(19)所示。

$$CCT_M(I_{d,R}, I_{d,G}) = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2 I_{d,R} + \alpha_3 I_{d,R}^2)(\beta_1 + \beta_2 I_{d,G} + \beta_3 I_{d,G}^2)}{\delta} \quad (19)$$

式中: δ 为在红绿 LED 驱动电流($I_{d,R}$ 、 $I_{d,G}$)取为常值时对应混合白光的 CCT 值,为可测量的确定值。

3 实验测试与分析

3.1 光谱补偿测试及 CCT 预测模型验证

为验证红绿光谱补偿在提高光谱性能方面的作用和所建 CCT 关系模型,在荧光型白光 LED 保持恒流驱动下,通过改变红绿 LED 的驱动电流开展光谱测试。测试实验中,所有 LED 均放置于温控热沉(Everfine, CL-200)之上进行恒温控制,恒温值设置为 25℃;各 LED 的驱动电流则由外部可编程直流电源(Rigol, DP832A)的不同通道提供。其中,荧光型白光 LED 在综合考虑照明需求、额定参数和光谱性能稳定性等因素后设置为 300 mA 恒流驱动,而红绿 LED 的驱动电流变化范围为 20 ~ 120 mA,间隔为 20 mA。所有光学测量均采用高精度快速光谱仪(Everfine, HAAS-2000)搭配专用积分球($\Phi 500$ mm)完成,且各 LED 在每一驱动状态组合下的测试数据均在系统稳定运行 20 min 后记录。

图5、6所示分别为光谱补偿机制下的冷白光 LED 系统和暖白光 LED 系统的混合光谱 CCT 的预测值与实测值的对比情况。由图5和6可见,混合光谱 CCT 的预测值与实测值吻合度较高。尤其是暖白光 LED 系统,其在红绿光谱补偿下的预测值与实测值非常接近。进一步地,对上述实验过程进行误差分析,以定量方式说明 CCT 非线性关系模型的预测能力,如表1、2所示。表1为冷白光 LED 系统和暖白光 LED 系统在典型驱动状态下的混合光谱 CCT 的预测值与实测值对比情况;表2为对应实验测试结果的总体误差。

表1和2中误差数据均较小,不超过 5%。该误差来源除了测量仪器精度等客观因素之外,主要源于系统中各 LED 的热效应和 GaN 基芯片的“efficiency droop”效应^[30-31]。此外,对比冷白光 LED 系统和暖白光 LED 系统,前者误差数据略高于后者,原因在于:冷白光 LED 相对于暖白光 LED 而言,由 GaN 基蓝光芯片产生的初始蓝光比重较大(图1),其对应的“efficiency droop”效应作用较强,故由其构成的冷白光 LED 系统的误差亦相对较大^[32]。

基于光谱补偿的白光 LED 系统除了能够实现混合光谱色温可调之外,还具有改善显色特性的优点。研究中用到的冷白光 LED 和暖白光 LED 在光谱补偿前的 CRI 分别为 75.9 和 77.8,而进行光谱补偿后显色指数最高分别达到 89.3 和 95.3,最大提高率分别为 17.65% 和 22.49%。作为对比,针对常用色温可调方法即双通道白光 LED 系统进行了显色特性的测试。结果显示,所用双通道白光 LED 系统的两个荧光型白光 LED 在单独测试

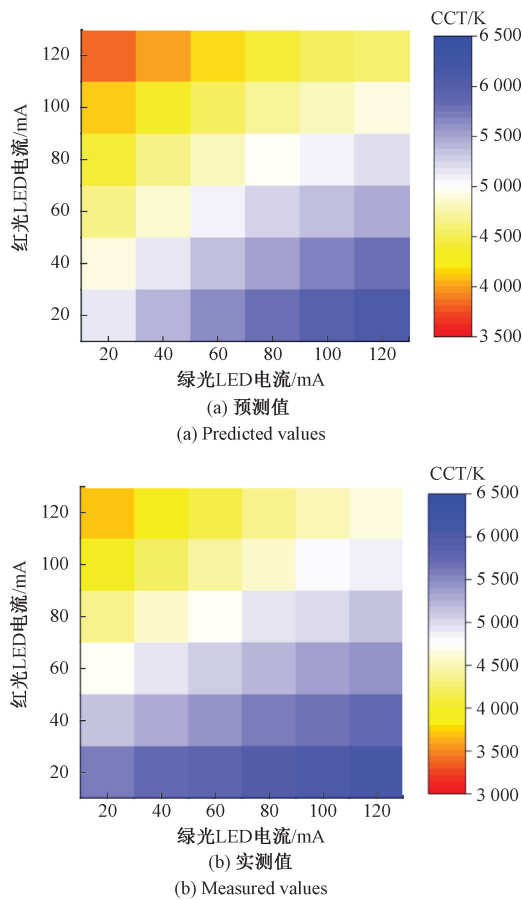


图 5 冷白光 LED 光谱补偿下的混合白光 CCT
Fig. 5 The correlated color temperature CCT of the cool white LED under spectral compensation

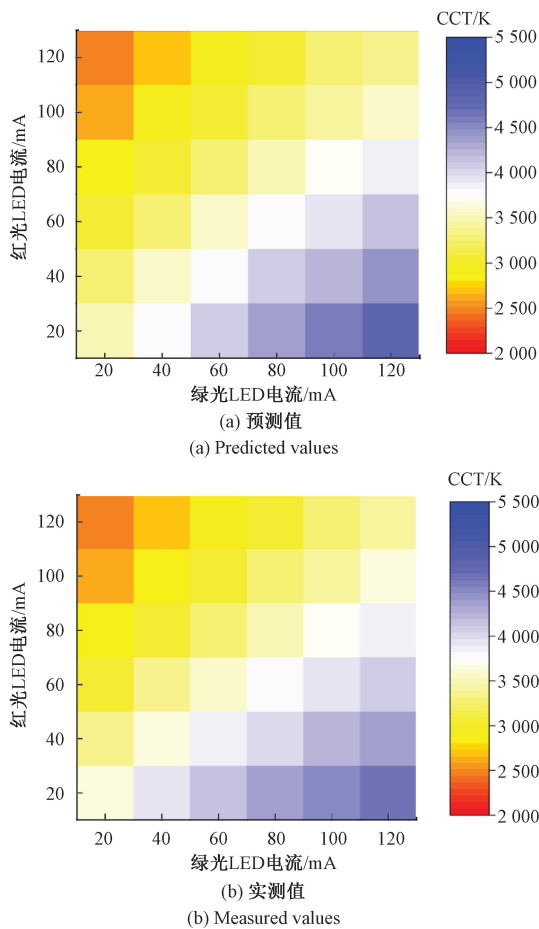


图 6 暖白光 LED 光谱补偿下的混合白光 CCT
Fig. 6 The correlated color temperature CCT of the warm white LED under spectral compensation

表 1 典型驱动条件下 CCT 预测值与实测值的对比

Table 1 Comparison of predictions and measurements of CCT under typical conditions

	电流 $I_{d,R}/\text{mA}$	电流 $I_{d,G}/\text{mA}$	预测 CCT/K	实测 CCT/K	绝对误差/K	相对误差/%
冷白光 LED 系统	20	20	5 365	5 599	234	4.18
	20	120	6 227	6 090	137	2.25
	120	20	3 813	3 671	142	3.87
	120	120	4 426	4 624	198	4.28
暖白光 LED 系统	20	20	3 655	3 563	92	2.58
	20	120	2 475	2 481	6	0.25
	120	20	4 667	4 773	106	2.22
	120	120	3 401	3 323	78	2.34

表 2 CCT 预测的总体误差分析

Table 2 Analysis of total errors in predictions of CCT

	最大绝对误差/K	平均绝对误差/K	最大相对误差/%	平均相对误差/%	均方差/K
冷白光 LED 系统	234	65	4.26	1.33	86
暖白 LED 系统	106	24	2.51	0.69	39

时 CRI 分别为 79.6 和 82.3,当二者叠加时 CRI 变化范围为 79.8~84.4,最大提升率为 6.03%。相较之下,所研

究的基于光谱补偿的白光 LED 系统在显色特性改善方面更具优势。

3.2 针对目标 CCT 的光谱补偿驱动控制

基于光谱补偿机制及所建立 CCT 关系模型,亦可针对混合光谱目标 CCT 实现对 LED 系统的驱动控制。在该测试环节,冷白光 LED 系统的 CCT 目标值分别为 3 000、3 500、4 000、4 500 和 5 000 K,而暖白光 LED 系统

的 CCT 目标值分别为 2 700、3 000、3 500、4 000 和 4 500 K。针对上述目标 CCT 实现驱动调节后的实际光谱功率分布如图 7 所示,相应的驱动电流以及 CCT 和 CRI 数据如表 3 所示。

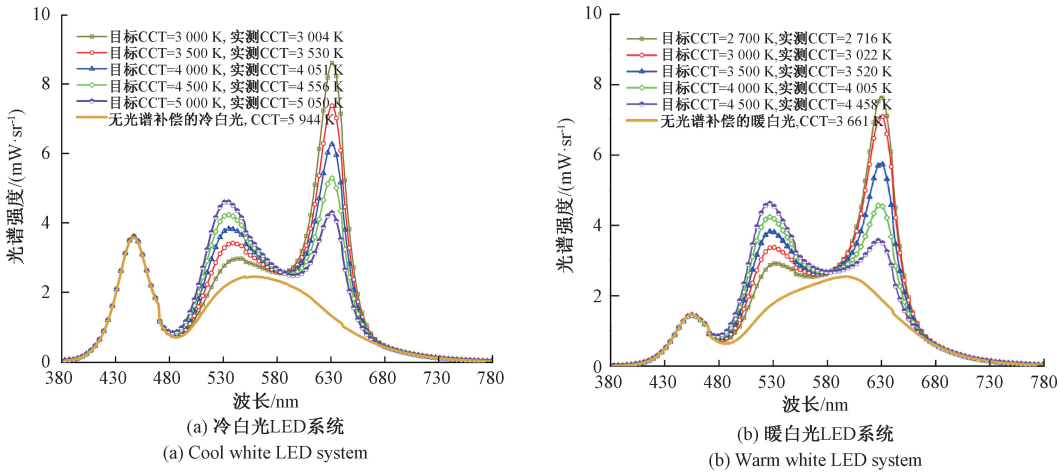


图 7 针对目标 CCT 的光谱补偿驱动控制及光谱特性

Fig. 7 Driving adjustment and spectral characteristics based on spectral compensation according to target CCT

表 3 基于光谱补偿驱动控制下的 CCT 和 CRI

Table 3 CCT and CRI under driving control based on spectral compensation

	目标 CCT/K	电流($I_{d,R}$, $I_{d,G}$)/mA	实测 CCT/K	CCT 相对误差/%	补偿前 CRI	补偿后 CRI	CRI 提高率/%
冷白光 LED 系统	3 000	(211, 40)	3 004	0.13	75.9	80.2	5.67
	3 500	(176, 60)	3 530	0.86	75.9	83.3	9.75
	4 000	(146, 80)	4 051	1.28	75.9	85.2	12.25
	4 500	(118, 100)	4 556	1.24	75.9	85.6	12.78
	5 000	(91, 120)	5 050	1.00	75.9	82.1	8.17
暖白光 LED 系统	2700	(120, 40)	2716	0.59	77.8	89.3	14.78
	3 000	(109, 60)	3 022	0.73	77.8	90.0	15.68
	3 500	(81, 80)	3 520	0.57	77.8	92.2	18.51
	4 000	(57, 100)	4 005	0.13	77.8	89.8	15.42
	4 500	(36, 120)	4 458	0.93	77.8	83.1	6.81

由图 7 可见,无论是冷白光 LED 系统还是暖白光 LED 系统,欲提高混合光谱的 CCT,应适当增加绿光补偿量,减少红光补偿量,即增大绿光 LED 电流、减小红光 LED 电流。相反,欲降低混合光谱的 CCT,应适当减少绿光补偿量,增加红光补偿量,即减小绿光 LED 电流、增大红光 LED 电流。

由表 3 可见,进行光谱补偿驱动控制后,CCT 的实测值与目标值之间的相对误差不超过 1.5%。就 CRI 而言,光谱补偿前,冷白光 LED 和暖白光 LED 的 CRI 分别为 75.9 和 77.8。而针对目标 CCT 进行光谱补偿驱动控制后,混合光谱的实际 CRI 均提高至 80 以上,满足了照明光源在物体色彩还原能力上的基本要求。对比光谱补偿前后,CRI 提升率整体均超过了 5%,最低为 6.81%,最高则达到了 18.51%。

实验测试结果证明了荧光型白光 LED 在光谱补偿机制下实现色温调节的能力,同时验证了混合光谱 CCT 非线性关系模型的有效性。可见,对荧光型白光 LED 进行红绿光谱补偿,有望兼顾照明光源的色温可调和高显色特性,以适应不同场景的照明需求。

4 结 论

在荧光型白光 LED 的基础上,结合红光 LED 和绿光 LED 构建了可调白光 LED 系统,通过光谱补偿的方式优化光谱结构和成分,兼具相关色温可调和显色特性提升的双重优点。基于 LED 器件的光电热特性和光谱色分析,建立了系统混合光谱相关色温的非线性关系模型。借助该模型,一方面可由 LED 的电学驱动状态快速预测

混合光谱的相关色温,另一方面可针对目标色温对LED进行反向的驱动控制,提高照明环境对不同场景的适用性。研究结果表明,红绿光谱补偿能够有效改善荧光型白光LED在光谱结构上的不足,提升混合光谱的连续性、均匀性和可调性,一定程度上解决了当前白光LED光源在色温可调和显色特性提升方面的矛盾。未来工作将针对光谱补偿下的白光LED系统,研究混合光谱在系统光电热耦合作用下的动态变化特性,建立光谱性能的动态模型并验证模型的有效性和鲁棒性。

参考文献

- [1] HUI S Y, LEE A T L, TAN S C. New dynamic photo-electro-thermal modeling of light-emitting diodes with phosphor coating as light converter part I: Theory, analysis, and modeling[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 771-779.
- [2] 苏拾,王逸文,张国玉,等. 太阳敏感器测试用运动式LED太阳模拟器研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 104-110.
SU S, WANG Y W, ZHANG G Y, et al. Research on mobile LED solar simulator for solar sensor testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 104-110.
- [3] NIE J X, CHEN Z Z, JIAO F, et al. Optimization of the dynamic light source considering human age effect on visual and non-visual performances[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107463.
- [4] LIU C, LI J X, WANG X N, et al. A review of subjective evaluation, physiological indicators and cognitive performance in indoor light environment: The role of illuminance and correlated color temperature [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 95: 110224.
- [5] 柯顺利,张思雨,朱明宽,等. 照明灯具灯光品质检测设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(5): 175-180.
KE SH L, ZHANG S Y, ZHU M K, et al. Design of lighting quality detector for lighting lamps [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(5): 175-180.
- [6] NIE J X, ZOU Q H, CHEN L Y, et al. The lower correlated color temperature with higher illuminance nocturnal light environment improves cognitive performance and sleep quality [J]. Building and Environment, 2024, 251: 111221.
- [7] 陈盛雄,朱大庆,廖欣怡. 一种预测白光LED相关色温的新方法[J]. 发光学报, 2017, 38(6): 820-827.
CHEN SH X, ZHU D Q, LIAO X Y. A new method for predicting correlated color temperature of white LEDs [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(6): 820-827.
- [8] HOUSER K M, ESPOSITO T, ROYER M P, et al. A method and tool to determine the colorimetric and photobiological properties of light transmitted through glass and other optical materials [J]. Building and Environment, 2022, 215(1): 108957.
- [9] DANG R, WANG N, LIU G, et al. Illumination in museums: Four-primary white LEDs to optimize the protective effect and color quality [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 8200315.
- [10] DING J Y, HUANG S J, ZHENG H L, et al. A novel broad-band cyan light-emitting oxynitride based phosphor used for realizing the full-visible-spectrum lighting of WLEDs [J]. Journal of Luminescence, 2021, 231: 117786.
- [11] 曾照明,万垂铭,肖国伟,等. 大功率白光LED荧光胶和荧光片玻璃封装的光热性能[J]. 发光学报, 2024, 45(3): 516.
ZENG ZH M, WAN CH M, XIAO G W, et al. Photothermal performance of high-power white led packaged with phosphor-in-silicone and phosphor-in-glass [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2024, 45(3): 516.
- [12] CHEN H T, TAN S C, HUI S Y. Nonlinear dimming and correlated color temperature control of bicolor white LED systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 6934-6947.
- [13] FERDOUS F, HARUN-UR RASHID A B M. Design optimization of an efficient bicolor LED driving system [J]. Electronics, 2022, 11(23): 3198.
- [14] WONG C P G, LEE A T L, LI K, et al. Precise luminous flux and color control of dimmable red-green-blue light-emitting diode systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 31(1): 588-606.
- [15] YAO Q, ZHANG L T, DAI Q, et al. Quantification of trichromatic light sources to achieve tunable photopic and mesopic luminous efficacy of radiation[J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 2019, 15(4): 271-280.
- [16] CHEN W, CAO D H, DONG Y J, et al. Enhancing luminous flux and color rendering of laser-excited YAG: Ce³⁺ single crystal phosphor plate via surface roughening and low-temperature sintering a CaAlSiN₃:Eu²⁺ phosphor-in-borate glass [J]. Journal of Luminescence, 2022, 251: 119225.
- [17] WANG A G, DAI J N, WANG H, et al. White light-emitting diodes with ultrahigh color rendering index by

- red/green phosphor layer configuration structure [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(12): 5209-5214.
- [18] ZHAO M, LIAO H X, MOLOKEEV M S, et al. Emerging ultra-narrow-band cyan-emitting phosphor for white LEDs with enhanced color rendition [J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 38.
- [19] LIANG R L, PENG Y, MOU Y, et al. Light efficiency investigation of ultraviolet light-emitting diodes combined with polarized emission and packaging structure [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(8): 4377-4381.
- [20] WANG H, DAI J N, SUN H D, et al. Phosphor glass-coated sapphire with moth-eye microstructures for ultraviolet-excited white light-emitting diodes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(7): 3007-3011.
- [21] LI M B, XIA S H, GUO W, et al. Promoting light extraction efficiency of ultraviolet light emitting diodes by nanostructure optimization [J]. Crystals, 2022, 12(11): 1601.
- [22] SUN Y S, ZHAO H Y, QIN Z X, et al. Significant enhancement of luminescence properties of YAG: Ce ceramics by differential grain sizes control [J]. Ceramics International, 2023, 49(10): 16156-16163.
- [23] 吕清洋, 薛秉国, 王婷婷, 等. 白光照明用 YAG: Ce 荧光薄膜研究进展 [J]. 发光学报, 2020, 41(11): 1323.
- LU Q Y, XUE B G, WANG T T, et al. Research progress of YAG:Ce fluorescent films for white lighting [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(11): 1323.
- [24] LYU L, HE J S, XIAO Q, et al. Synthesis and optical properties of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, Cr^{3+} nano-phosphor for white LED [J]. Ceramics International, 2023, 49(17): 28457-28464.
- [25] 王标, 周雅兰, 王永红. 改进型 Faster R-CNN 网络在电子元件 LED 气泡缺陷检测中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(9): 136-143.
- WANG B, ZHOU Y L, WANG Y H. Application of improved faster R-CNN network in bubbles defect detection of electronic component LED [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(9): 136-143.
- [26] LIU M, LI W, CHEN W, et al. Junction temperature and luminous flux prediction for white LED array based on electrical-photo-thermal modeling [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 54: 103940.
- [27] HUI S Y, QIN Y X. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(8): 1967-1976.
- [28] LIU G H, CHEN H T, ZHENG Y, et al. Two-dimensional photothermal modeling of multichip LEDs device with thermal coupling matrix by microscopic hyperspectral imaging [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(10): 6198-6207.
- [29] 刘观洪, 张文杰, 陈焕庭, 等. 基于纹波特性的白光 LED 器件动态及稳态光通量模型 [J]. 光学学报, 2023, 43(14): 245-256.
- LIU G H, ZHANG W J, CHEN H T, et al. Dynamic and steady luminous flux model for white LED devices based on ripple properties [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(14): 245-256.
- [30] HUANG A J, PUKHOV K K, WONG K L, et al. Temperature dependence of the local field effect in YAG: Ce^{3+} nanocomposites [J]. Nanoscale, 2021, 13(22): 10002-100091.
- [31] WANG H, MOU Y, LEI Z, et al. Enhanced color quality of phosphor-converted white laser diodes through bicolor phosphor-in-glass [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(11): 5652-5655.
- [32] CHOW Y C, LYNSKY C, NAKAMURA S, et al. Low-efficiency-droop c-plane InGaN/GaN light-emitting [J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133(14): 143101.

作者简介



沈雪华 (通信作者), 2012 和 2016 年分别于重庆大学获得学士和博士学位, 现为广州航海学院副教授, 主要研究方向为检测与控制技术、半导体照明技术。
E-mail: fj_sxh39@163.com

Shen Xuehua (Corresponding author) received her B. Sc. and Ph. D. degree from Chongqing University in 2012 and 2016, respectively. Now she is an associate professor in Guangzhou Maritime University. Her main research interests include detection and control technology, and semiconductor lighting technology.



陈焕庭, 2010 年于厦门大学获得博士学位, 现为闽南师范大学教授, 福建省高等学校新世纪优秀人才, 主要研究方向为半导体照明技术相关领域。
E-mail: htchen23@qq.com

Chen Huanting received his Ph. D. degree from Xiamen University in 2010. Now he is a professor in Minnan Normal University, and he has been awarded the title of "Outstanding Talent in the New Century of Fujian Provincial Colleges and Universities". His main research interests include semiconductor lighting technology and the related fields.