

文章编号: 1000-7032(2024)01-0103-08

荧光粉配比和激发波长对高品质白光LED的影响

赵见国^{1*}, 索博研^{1,2}, 徐 儒¹, 王书昶^{2*}, 张惠国², 常建华¹

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 常熟理工学院 电子信息工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘要: 随着人们对照明光源品质要求的不断提高, 单一的指标参数已不能完全满足对LED的评价。本文研究了荧光粉配比和激发波长对白光LED的显色指数、光谱功率分布的蓝光危害占比指数、光谱连续度和光效等参数的影响。研究发现, 合适的荧光粉种类和配比可以降低荧光粉之间的二次吸收、减少能量损失、光线衰减以及光谱的畸变, 实现白光LED品质的提升。此外, 不同波长蓝光LED激发荧光粉的优势各不相同, 通过组合使用, 可提高白光LED的显色指数、光谱连续度, 降低光谱功率分布的蓝光危害占比指数。本文采用普通商用450 nm和460 nm的蓝光LED芯片激发优化后的荧光粉, 显著提高了白光LED的品质, 其显色指数、光谱功率分布的蓝光危害占比指数、光谱连续度和光效分别为97.4、26.3%、93.6%和98.75 lm/W。本研究为高品质白光LED的制备提供了完备的参考依据, 有利于推动高品质白光LED的普及。

关键词: 高品质LED; 激发波长; 荧光粉配比

中图分类号: TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230252

Influence of Phosphor Ratio and Emission Wavelength on High Quality White Light LED

ZHAO Jianguo^{1*}, SUO Boyan^{1,2}, XU Ru¹, WANG Shuchang^{2*}, ZHANG Huiguo², CHANG Jianhua¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhaojg@nuist.edu.cn; scw@cslg.edu.cn

Abstract: With the continuous improvement of people's requirements for the quality of lighting sources, a single indicator parameter cannot fully satisfy the evaluation of LEDs. This study investigates the effects of phosphor ratio and emission wavelength on the color rendering index, the blue light hazard ratio of spectral power distribution, spectral continuity, and light efficiency of white light LEDs. The results show that the appropriate phosphor type and ratio can reduce the secondary absorption between phosphors, energy loss, light attenuation, and spectral distortion, thereby improving the quality of white light LEDs. Moreover, different wavelengths of blue light LED excitation phosphors offer distinct advantages. By combining them, it is possible to improve the white light LED's color index, spectral continuity, and reduce the blue light hazard ratio of spectral power distribution. In this study, commercially available 450 nm and 460 nm blue light LED chips were employed to emit the optimized phosphor, resulting in a significant improvement in the quality of white light LEDs. The color index, blue light hazard ratio of spectral power distribution, spectral continuity, and light efficiency were measured as 97.4, 26.3%, 93.6% and 98.75 lm/W, respectively. This research provides a comprehensive reference for the production of high-quality white light LEDs, which can contribute to the widespread adoption of high-quality white light LEDs.

Key words: high quality LED; emission wavelength; phosphor ratio

收稿日期: 2023-10-23; 修订日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(62204121, 62005026)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62204121, 62005026)

1 引 言

白色发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为一种已经普及的照明技术,在照明行业中展现出了高效、节能^[1-3]以及环保^[4-6]等诸多优势。随着LED技术的不断发展和进步,白光LED的应用范围也在不断扩大。人们对LED的要求越来越高,用单一标准评判LED的性能无法体现高品质LED的优势所在。

显色指数(R_a)代表了光源对于物体颜色的显现能力^[7-9],是评判LED品质的一个重要标准。光谱功率分布的蓝光危害占比指数(下文简称为蓝光危害占比指数,Br,定义见补充文件)也成为考量LED是否为高品质的标准之一。自从LED照明产品广泛应用以来,人们对蓝光危害越来越关注。因此,出现了很多评价蓝光危害的标准。例如,国际上制定了对灯具和灯具系统的光生物安全性评价标准:IEC/EN 62471^[10],其中提出了视网膜风险光谱加权函数;此外,IEC/TR 6277^[11]对照明产品的蓝光危险等级分类提供了指导。国内也提出了针对光源和灯具的蓝光危害评价标准:GB/T 20145^[12]。目前,LED健康照明光源的研究重点主要集中在光生物辐射安全、光的视觉和非视觉效应方面^[13-15]。LED的光谱连续度(C_s ,定义见补充文件)也是一个重要标准,目前白光LED光谱普遍存在460~490 nm波段缺失以及620~750 nm波段不足^[16]的问题,从而导致光谱中存在光峰或光谷现象,其光谱连续度较低,影响人眼对颜色辨识的能力^[17]。因此,提高LED的光谱连续度可以获得更准确、更自然的颜色表现。此外,光效反映了LED的能源利用率和能源消耗情况,是衡量LED性能的重要指标之一,也是高品质白光LED必须要考虑的标准之一^[18-19]。

本文使用商用普通蓝光LED芯片激发优化后的荧光粉制备白光LED,研究了荧光粉配比、激发波长和驱动电流对白光LED的显色指数、蓝光危害占比指数、光谱连续度和光效等指标的影响。最终获得了在额定功率下,显色指数、光谱连续度和光效分别达到97.4、93.6%和98.75 lm/W,而蓝光危害占比指数仅为26.3%的高品质白光LED,可用于高品质生活健康照明、教育照明等领域。

2 实 验

2.1 实验用品及设备

实验用品:芯片尺寸为30 mil×30 mil、额定功率为1 W的商用蓝光LED,峰值波长分别为450, 460, 480 nm,并分别记为L450、L460和L480,其额定功率下的电光转换效率分别为43%、26%和42%(具体性能参数见补充文件图4);如表1所示的普通商用荧光粉;深圳市盟科技有限公司的SCR-1018硅胶(A胶:B胶=1:4配合使用)。测试设备采用的是杭州远方光电的LED自动温控光电分析测量系统——ATA-500以及荧光粉激发光谱与热猝灭分析系统——EX-1000。

表1 荧光粉参数表

Tab. 1 Table of parameters for phosphors

荧光粉	CIE _x	CIE _y	波长/nm	颜色
BaSi ₂ O ₂ N ₂ :Eu-495	0.090	0.460	495	蓝绿色
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce-538	0.385	0.565	538	黄绿色
Ga-YAG:Ce-538	0.373	0.572	538	黄绿色
GaAlSiN ₃ :Eu-650	0.675	0.329	650	红色

2.2 实验流程

制备白光LED的实验流程如下。

(1)芯片分组:首先,根据不同荧光粉的发射、激发光谱选用适合每个LED的荧光粉组合,以减少荧光粉之间的二次吸收(荧光粉参数测试及选择策略见补充文件第3节)。按照所用蓝光LED和荧光粉的不同,制备了表2所示的4组白光LED系列样品。其中,A系列使用L450激发荧光粉;B系列使用L450激发荧光粉后串联未激发荧光粉的蓝光LED:L480,用于补充460~490 nm波段的光谱;C系列使用L460激发荧光粉;D系列为双芯片方案,即A系列与C系列白光LED串联而成。

(2)配比荧光胶:A系列样品:使用L450激发BaSi₂O₂N₂:Eu-495、Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538、GaAlSiN₃:Eu-650共制备了17个白光LED样品,用于研究荧光粉配比对白光LED显色指数和光效的影响。具体过程如下:根据已报道的研究^[20-21]和实验室前期的实验结果,将荧光粉BaSi₂O₂N₂:Eu-495、Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538和GaAlSiN₃:Eu-650的初始比例设定为0.183:1:0.17。在此基础上,保持Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538和GaAlSiN₃:Eu-650的质量不变,改变BaSi₂O₂N₂:Eu-495的质量制备了10个LED样品,测试得到BaSi₂O₂N₂:Eu-495与Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538的

表 2 实验样品概述表

Tab. 2 Summary table of experimental samples

白光 LED	所用 LED	所用荧光粉
A 系列	L450	BaSi ₂ O ₂ N ₂ :Eu-495、Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce-538、GaAlSiN ₃ :Eu-650
B 系列	L450、L480	BaSi ₂ O ₂ N ₂ :Eu-495、Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce-538、GaAlSiN ₃ :Eu-650
C 系列	L460	BaSi ₂ O ₂ N ₂ :Eu-495、Ga-YAG:Ce-538、GaAlSiN ₃ :Eu-650
D 系列	L450、L460	BaSi ₂ O ₂ N ₂ :Eu-495、Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce-538、 Ga-YAG:Ce-538、GaAlSiN ₃ :Eu-650

最佳比例。后续采用该比例,改变 GaAlSiN₃:Eu-650 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 比例制备了 7 个 LED,测试得到 GaAlSiN₃:Eu-650 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 的最佳比例,最终获得三种荧光粉的最佳配比,制备了 A 系列样品中性能最好的白光 LED,并记为 EFPR-A(Excellent fluorescent powder ratio-A)。B、C 系列样品:采用上述荧光粉配比优化策略,分别制作多个白光 LED 获得最佳荧光粉比例,并将基于最佳比例制备的白光 LED 分别记为:EFPR-B 和 EFPR-C。D 系列样品:在 EFPR-A 基础上,串联不同荧光粉配比的 C 系列样品,获得 D 系列样品,并将性能最佳的 D 系列白光 LED 记为 EFPR-D。

完成荧光粉称量后,称取 SCR-1018 硅胶与抗沉淀粉,其中荧光粉:硅胶为 1:1.108,抗沉淀粉为硅胶总质量的 0.12%^[17]。随后放入匀胶机进行匀胶,然后放入真空泵内消除气泡,完成荧光胶配比。

(3)点胶:将荧光胶倒入点胶机中,均匀地将荧光胶点入固晶焊线好的支架中。

(4)烘烤:将点胶后的 LED 放入烤箱,在 80, 120, 150 °C 条件下依次烘烤 90, 90, 180 min,完成白光 LED 制备。

(5)测试:利用 ATA-500 对样品进行测试。

3 结果与讨论

3.1 不同荧光粉对比对白光 LED 的影响

图 1 展示了 BaSi₂O₂N₂:Eu-495 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 比例改变时,A 系列样品的显色指数及光效。显然,随着 BaSi₂O₂N₂:Eu-495 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 比例的增加,A 系列白光 LED 的显色指数和光效先增加后减小。在 BaSi₂O₂N₂:Eu-495 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 比例为 0.223:1 时,光效和显色指数分别达到 98.82 lm/W 和 95.3。

从图 2 可以发现,随着 GaAlSiN₃:Eu-650 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 比例的增加,A 系列白光 LED 的

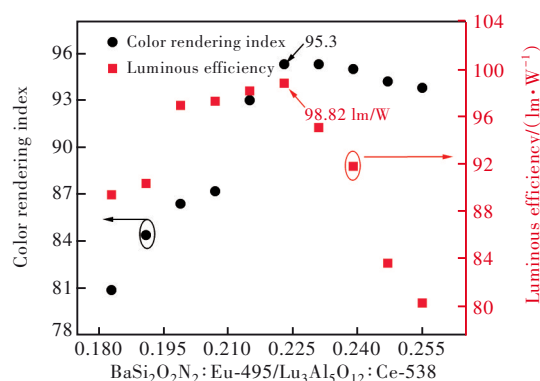


图 1 不同 BaSi₂O₂N₂:Eu-495/Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 对白光 LED 性能的影响

Fig.1 The influence of different BaSi₂O₂N₂:Eu-495/Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 on the performance of white light LED

显色指数和光效也先增加后减小。在 GaAlSiN₃:Eu-650 与 Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 比例为 0.145:1 时,白光 LED 的发光效率为 102.2 lm/W,显色指数为 95.5,效果最佳,此时荧光粉 BaSi₂O₂N₂:Eu-495、Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 与 GaAlSiN₃:Eu-650 的比例为 0.223:1:0.145。在荧光粉配比优化之后,相较于本系列的初始比例,白光 LED 的显色指数增加了 14.6,光效增加了 12.8 lm/W。图 3 展示了 EFPR-A 的光谱。根据计算,EFPR-A 的蓝光危害占比指

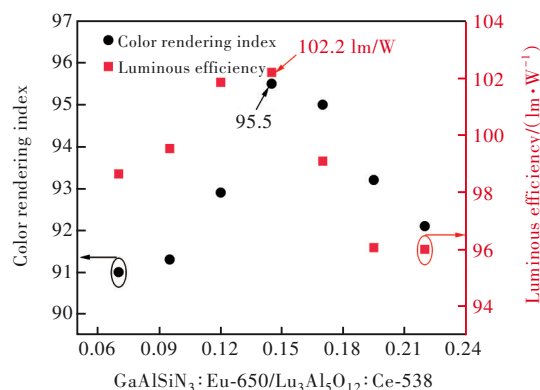


图 2 不同 GaAlSiN₃:Eu-650/Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 对白光 LED 性能的影响

Fig.2 The influence of different GaAlSiN₃:Eu-650/Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 on the performance of white light LED

数为 36.79%, 光谱连续度为 87.1%。

3.2 不同激发波长对白光 LED 的影响

虽然 EFPR-A 的显色指数已经达到了 95.5, 然而, 由于缺乏了 460~490 nm 青光部分光谱, 光谱连续度仅为 87.1%, 仍有提升空间。从图 3 可以看出其 LED 光谱存在明显的“光谷”以及“光峰”现象, 这种光谱不连续性会导致色差问题^[17]。为了解决这个问题, B 系列样品在 EFPR-A 的基础上串联 L480 用于补充青光波段以提高光谱连续度。然而, 串联 L480 导致光谱中绿光部分增多, 因此我们减少了 EFPR-A 配比中 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}-538$ 的比例。最终, B 系列样品中最佳的荧光粉 $\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}-495$ 、 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}-538$ 与 $\text{GaAlSiN}_3:\text{Eu}-650$ 的比例为 0.25:1:0.16。制备的 EFPR-B 具有更加连续的光谱(图 4), 其显色指数、蓝光危害占比指数、光谱连续度和光效分别为 96.1、35.23%、95.1% 和 43.38 lm/W。

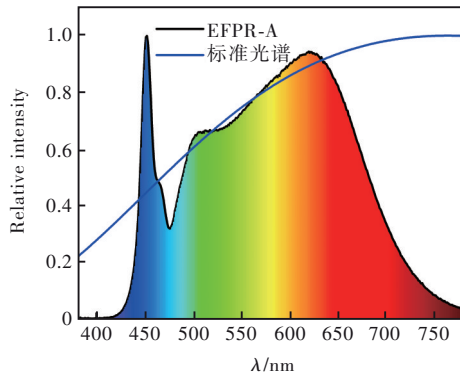


图 3 最佳配比下制备的 EFPR-A 光谱

Fig.3 The spectrum of EFPR-A prepared at the optimal ratio

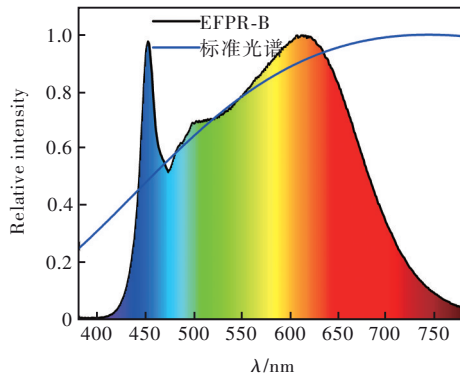


图 4 最佳配比下 EFPR-B 的光谱

Fig.4 The spectrum of EFPR-B prepared at the optimal ratio

与 EFPR-A 相比, EFPR-B 的蓝光峰值被小幅度削弱, 并且 460~490 nm 部分的光谱获得了补充, 其显色指数提高了 0.6, 蓝光危害占比指数降低了 1.56%, 光谱连续度提升了 8%。然而, 串联

L480 后光效降低, 仅为 43.38 lm/W。这是因为人眼对不同波长光的感知效果不同, 根据明视觉函数, 人眼对 550 nm 波段的光感知最强, 而对 460~490 nm 波段的青光感知较弱^[22-23]。因此, 单独补充青光会牺牲整体的光效。

另一方面, EFPR-A 与 EFPR-B 的蓝光危害占比指数均大于 30%, 这是因为蓝光危害加权函数中, 440 nm 为视网膜色素上皮组织最危险的蓝光波长^[17], 而峰值波长为 450 nm 的蓝光 LED 芯片 L450 发出了较大功率的“危险蓝光”波段。为了减少 440 nm 波段的蓝光, 我们采用 L460 避开 440 nm 波段制备 C 系列样品。C 系列样品中最佳的荧光粉 $\text{BaSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}-495$ 、 $\text{Ga}-\text{YAG}:\text{Ce}-538$ 与 $\text{GaAlSiN}_3:\text{Eu}-650$ 的比例为 0.29:1:0.11。图 5 为 L460 激发荧光粉所制备的 EFPR-C 的光谱。此时的 EFPR-C 显色指数、蓝光危害占比指数、光谱连续度和光效分别为 91.7、20.62%、86.7% 和 51.19 lm/W。

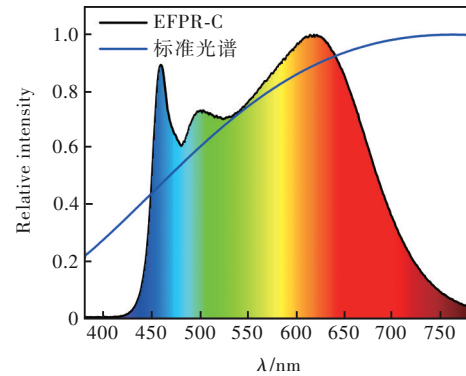


图 5 最佳配比下 EFPR-C 的光谱

Fig.5 The spectrum of EFPR-C prepared at the optimal ratio

实验结果表明, 相比于 EFPR-A, EFPR-C 的显色指数和光效下降, 光谱连续度略微下降。但是蓝光危害占比指数显著改善, 下降了 16.17%, 这表明使用偏离 440 nm 波段的蓝光 LED 制备白光 LED 可以显著减小蓝光危害占比指数, 有效提高白光 LED 的品质。但是, EFPR-A 和 EFPR-C 都显示出明显的蓝光峰值, 导致较低的光谱连续度。因此, 仅通过调整荧光粉配比很难有效降低蓝光峰值以提高光谱连续度, 获得综合指标优异的高品质白光 LED。

为进一步提高白光 LED 的综合品质, D 系列白光 LED 采用双蓝光芯片方案。研究发现, EFPR-D 恰好是 EFPR-A 与 EFPR-C 串联得到的白光 LED, 图 6 展示了其光谱。EFPR-D 在额定功率下实现高达 97.4 的显色指数, 其蓝光危害占比指数仅为

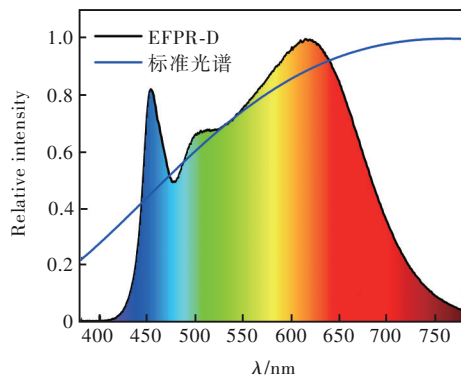


图 6 最佳配比下 EFPR-D 的光谱

Fig.6 The spectrum of EFPR-D prepared at the optimal ratio 26.3%, 光谱连续度为 93.6%, 光效为 98.75 lm/W。该结果与 2018 年报道的双蓝光芯片方案的最优结果^[24]相比, EFPR-D 的蓝光危害占比指数降低了 7.5%, 光谱连续度提升了 11.1%; 与 2020 年

报道的双蓝光芯片方案的最优结果^[17]相比, EFPR-D 的蓝光危害占比指数降低了 8.9%, 光谱连续度提升了 4.5%。

通过表 3 可以发现, 相比于 EFPR-A, EFPR-D 改善了显色指数、蓝光危害占比指数、光谱连续度, 但由于 L460 的电光转换效率比 L450 低 17%, 光效略有降低。与 EFPR-B 相比, EFPR-D 改善了显色指数、蓝光危害占比指数、光效, 光谱连续度略有不足。对比 EFPR-C, EFPR-D 的显色指数、光谱连续度、光效均有提升, 蓝光危害占比指数略微偏高。这是因为 EFPR-D 的蓝光峰相较于 EFPR-C 更靠近“危险蓝光”440 nm, 从而造成了蓝光危害占比指数提高。综上所述, EFPR-D 综合品质最好, 该 LED 可用于高品质生活健康照明、教育照明灯等领域。

表 3 不同蓝光芯片制备白光 LED 样品对比

Tab. 3 Comparison of white light LED samples prepared with different blue chips

	Color rendering index	Blue light hazard ratio index/%	Spectral continuity/%	Luminous efficiency/(lm·W ⁻¹)
EFPR-A	95.5	36.79	87.1	102.20
EFPR-B	96.1	35.23	95.1	43.38
EFPR-C	91.7	20.62	86.7	51.19
EFPR-D	97.4	26.30	93.6	98.75

3.3 不同驱动电流对白光 LED 的影响

EFPR-D 为 EFPR-A 和 EFPR-C 串联获得, 因此本研究进一步测量了 EFPR-A 和 EFPR-C 在 30 ~ 300 mA 驱动电流下的光谱 (见补充文件图 8、图 9), 并计算了不同电流下 EFPR-A 和 EFPR-C 的 4 项指标参数, 如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出, 当驱动电流从 30 mA 增加至 300 mA 时, EFPR-A 的光谱连续度从 95.8% 降至 87.1%, 说明其光

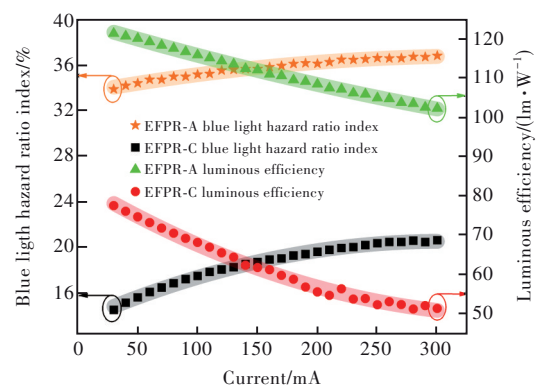


图 8 不同驱动电流下蓝光危害占比指数、光效的变化
Fig.8 The change of blue light hazard ratio index and light efficiency under different driving current

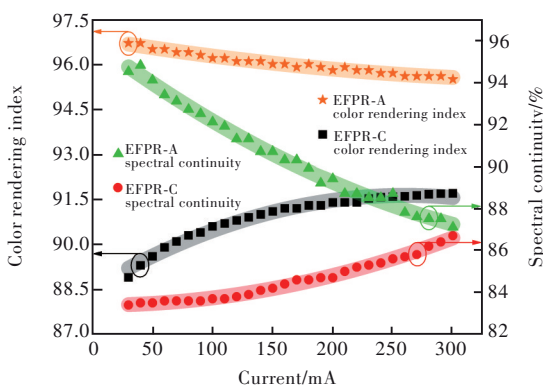


图 7 不同驱动电流下显色指数、光谱连续度的变化
Fig.7 The change of color rendering index and spectral continuity under different driving current

谱逐渐偏离标准光谱; 与此相反, EFPR-C 的光谱连续度从 83.4% 增至 86.7%, 表明其光谱逐渐接近标准光谱; 因此, EFPR-A 的显色指数从 96.8 降至 95.5, 而 EFPR-C 的显色指数从 88.9 增至 91.7。实际上, EFPR-D 的光谱为 EFPR-A 与 EFPR-C 光谱的叠加, 这种叠加使 EFPR-D 的光谱更接近于标准光谱, 因此 EFPR-D 在 300 mA 电流下的光谱连续度和显色指数分别达到 93.6% 和 97.4。

另外,随着电流的升高,EFPR-A 和 EFPR-C 的蓝光危害占比指数均增大,这归因于蓝光 LED 因极化电场导致的量子限制斯塔克效应^[25-30]引起的 3 nm 蓝移(见补充文件图 1 和图 2),使光谱的蓝光峰更靠近“危险蓝光”440 nm。因为蓝光 LED 的电光转换效率随电流的升高而降低,因此导致了 EFPR-A 和 EFPR-C 光效降低。

4 结 论

本研究旨在分析不同荧光粉配比和不同激发波长对于白光 LED 的影响,得出以下结论:(1)利用 L450 激发最佳配比为 0.223:1:0.145 的 Ba-Si₂O₂N₂:Eu-495、Lu₃Al₅O₁₂:Ce-538 和 GaAlSiN₃:Eu-650 荧光粉,获得显色指数、光谱功率分布的蓝光危害占比指数、光谱连续度和光效分别为 95.5、36.79%、87.1% 和 102.2 lm/W 的 EFPR-A。(2)相较于传统蓝光 LED,采用 L450 芯片搭配 L480 芯片,有效弥补了 460~490 nm 部分的光谱缺失,用其制备的 EFPR-B 的光谱连续度达到

95.1%,缓解了“光谷”、“光峰”带来的色差问题。(3)从技术原理和技术实现上,本研究避免最危险的 440 nm 的蓝光波长,转而使用长波长蓝光芯片激发荧光粉制备蓝光危害占比指数仅为 20.62% 的 EFPR-C,有效地减少了蓝光危害。(4)使用电光转换效率仅为 26%(L460)和 43%(L450)的双蓝光 LED 芯片激发优化后的荧光粉,成功制备了高品质白光 LED 样品 EFPR-D。在 2 W 的额定功率驱动下,实现了高达 97.4 的显色指数,其蓝光危害占比指数仅为 26.3%,光谱连续度为 93.6%,光效为 98.75 lm/W。实现了对蓝光峰值的削减,在保证显色指数、光谱连续度、光效的同时改变蓝光功率分布,有效减少了蓝光危害占比指数。该 LED 可用于高品质生活健康照明和教育照明灯领域。

本文补充文件和专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230252>。

参 考 文 献:

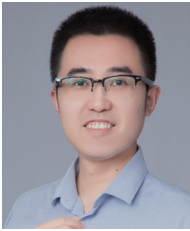
- [1] SHINDE K N. Luminescence in Eu²⁺ and Ce³⁺ doped SrCaP₂O₇ phosphors [J]. *Results Phys.*, 2017, 7: 178-182.
- [2] LI H, LIU H B, TAO X M, *et al.* Novel single component tri-rare-earth emitting MOF for warm white light LED [J]. *Dalton Trans.*, 2018, 47(25): 8427-8433.
- [3] YUAN Y, ZHENG R L, LU Q, *et al.* Excellent color rendering index and high quantum efficiency of rare-earth-free fluo-silicate glass for single-phase white light phosphor [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(13): 3122-3125.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50034-2013 建筑照明设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50034-2013 Standard for lighting design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 243-2011 交通建筑电气设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. JGJ 243-2011 Code for electrical design of transportation buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [6] 陈雄, 潘勇, 钟世权, 等. 广州白云国际机场二号航站楼公共空间照明设计 [J]. *云南建筑*, 2018(6): 31-37. CHEN X, PAN Y, ZHONG S Q, *et al.* Lighting design for public space in No. 2 terminal building of Guangzhou Baiyun international airport [J]. *Yunnan Archit.*, 2018(6): 31-37 (in Chinese)
- [7] International Commission on Illumination. *Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources* [M]. London: Central Bureau of the CIE, 1988.
- [8] CIE. CIE 13.3-1995 Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources [S]. Vienna: CIE, 1995.
- [9] YING S P, SHEN J Y. Concentric ring phosphor geometry on the luminous efficiency of white-light-emitting diodes with excellent color rendering property [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(9): 1989-1992.
- [10] IEC. IEC 62471:2006 Photobiological safety of lamps and lamp systems [S]. Geneva: IEC, 2006.
- [11] International Electrotechnical Commission. Application of IEC 62471 for the blue light hazard to light sources and luminaires [S]. Ankara: Teknik Kurul, 2016.

- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/Z 39942-2021 应用 GB/T 20145 评价光源和灯具的蓝光危害 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Administration Standardization. GB/Z 39942-2021 Application of GB/T 20145 for the assessment of blue light hazard to light sources and luminaires [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [13] 曹小兵, 黎兰兰, 冉崇高, 等. 健康照明之全光谱LED应用展望 [J]. 中国照明电器, 2019(5): 11-14.
CAO X B, LI L L, RAN C G, *et al.* Prospects for full spectrum LED applications for healthful lighting [J]. *China Light Light.*, 2019(5): 11-14. (in Chinese)
- [14] 王茜, 郝洛西, 曾堃. 健康光照环境的研究现状及应用展望 [J]. 照明工程学报, 2012, 23(3): 12-17.
WANG Q, HAO L X, ZENG K. Research progress and application prospect of healthy lighting [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2012, 23(3): 12-17. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 7000.1-2015 灯具 第1部分: 一般要求与试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 7000.1-2015 Luminaires—Part 1: General requirements and tests [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [16] 赵芳仪, 刘小浪, 宋振, 等. 超高显色指数、全光谱白光LED封装技术 [J]. 照明工程学报, 2019, 30(3): 75-80.
ZHAO F Y, LIU X L, SONG Z, *et al.* Packaging technology for ultra-high color rendering index and full spectrum white LED [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2019, 30(3): 75-80. (in Chinese)
- [17] 秦永豪. 高品质健康LED光源的制备与研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
QIN Y H. *Preparation and Research of High Quality Healthy LED Light Source* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [18] MIRHOSSEINI R, SCHUBERT M F, CHHAJED S, *et al.* Improved color rendering and luminous efficacy in phosphor-converted white light-emitting diodes by use of dual-blue emitting active regions [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(13): 10806-108013.
- [19] KARPOV S Y. Light-emitting diodes for solid-state lighting: searching room for improvements [C]. *Proceedings of SPIE 9768, Light-emitting Diodes: Materials, Devices, and Applications for Solid State Lighting XX, San Francisco*, 2016: 97680C.
- [20] XU J W, CHEN G Q. Realizing white LEDs with high luminous efficiency and high color rendering index by using double green phosphors [J]. *Results Phys.*, 2019, 15: 102648.
- [21] 王金亮, 华有杰. 荧光粉比对大功率白光LED发光特性的影响 [J]. 电子与封装, 2014, 14(12): 45-48.
WANG J L, HUA Y J. The influence of phosphor ratio on the high-power white LED's emission characteristics [J]. *Electron. Packag.*, 2014, 14(12): 45-48. (in Chinese)
- [22] 迈克·伍德, 施端. 新旧明视觉光谱光视效率曲线 [J]. 演艺科技, 2021(10): 1-4.
WOOD M, SHI D. Photopic curves—the old and the new [J]. *Entertain. Technol.*, 2021(10): 1-4. (in Chinese)
- [23] 黄彦, 杨春宇. 光源光色对明视觉功效影响的模拟实验研究 [J]. 灯与照明, 2015, 39(3): 1-4.
HUANG Y, YANG C Y. The simulative experimental analysis of the effect of light color on photopic visual performance [J]. *Light Light.*, 2015, 39(3): 1-4. (in Chinese)
- [24] LIU J G, TANG W, QIN Y H, *et al.* Quantitative analysis of full spectrum LEDs for high quality lighting [C]. *2018 15th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China, Shenzhen, China*, 2018: 1-5.
- [25] 孙陈红. 大电流注入下绿光LED光电特性研究 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
SUN C H. *Study on Electroluminescence of Green LED Under High Injection Current* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017. (in Chinese)
- [26] 刘一兵. GaN基蓝光LED峰值波长蓝移现象分析及解决措施 [J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(3): 87-90.
LIU Y B. Phenomenon analysis and solution measure for blue GaN-based LEDs peak wavelength blue moves [J]. *J. Hunan Univ. Technol.*, 2008, 22(3): 87-90. (in Chinese)
- [27] 崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰, 等. 注入电流对GaN基LED发光特性的影响 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(9): 1309-

1312.

CUI D S, GUO W L, CUI B *et al.* Effect of injection current on luminescence characteristics of GaN-based LED [J]. *J. Optoelectron. · Laser*, 2011, 22(9): 1309-1312. (in Chinese)

- [28] 林介本, 郭震宁, 陈丽白, 等. 瓦级大功率InGaN蓝光LED的光色电特性 [J]. 发光学报, 2009, 30(3): 379-384.
LIN J B, GUO Z N, CHEN L B, *et al.* Watt-level high power InGaN-based blue LED photometric, chromatic and electric characteristics [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2009, 30(3): 379-384. (in Chinese)
- [29] ZHAO J G, CHEN K, GONG M G, *et al.* Epitaxial growth and characteristics of nonpolar *a*-plane InGaN films with blue-green-red emission and entire in content range [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2022, 39(4): 048101.
- [30] CHEN K, ZHAO J G, DING Y, *et al.* Effects of Mg-doping temperature on structural and electrical properties of nonpolar *a*-plane p-type GaN films [J]. *Chin. Phys. B*, 2023, doi: 10.1088/1674-1056/acdc0b.



赵见国(1990-),男,山东莒县人,博士,讲师,2019年于东南大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体生长与相关器件的研究。

E-mail: zhaojg@nuist.edu.cn



王书昶(1985-),男,江苏建湖人,博士,副教授,2015年于东南大学获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料与器件的研究。

E-mail: scw@cslg.edu.cn