

高显色指数 LED 光谱配比与色度参数的关系

杨宇铭¹, 李 燕¹, 周天亮², 郑怀文¹, 杨 华¹,
伊晓燕¹, 王军喜¹, 李晋闽¹

(1. 中国科学院半导体研究所, 中国科学院半导体照明研发中心, 中国科学院大学,
北京第三代半导体材料与应用工程技术研发中心, 半导体照明联合创新国家重点实验室,
北京 100083; 2. 厦门大学材料学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 为了提高 LED 光源的显色性一般需要改变不同的荧光粉成分, 理论上利用不同峰值的荧光粉配比可以实现类似的色温和显色指数。我们采用典型的蓝光 LED、3 种不同峰值波长的绿色/黄绿色荧光材料与典型红色荧光材料进行 5 种基本光谱的组合, 对每种组合的色度学参数包括色坐标、相关色温、显色指数等进行了仿真计算, 并对相近色温下的技术方案和显色性的关系进行了统计和分析。结果表明, 在这一技术方案下色温和显色指数在可以较好地确定白光 LED 光谱的整体形态, 同时更高的显色指数可以更好地约束所能采用的配比。

关键词: 显色指数; 荧光粉; 光谱; LED

中图分类号: TM923

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2019.05.017



The Relationship between Spectral Ratio and Chromaticity Parameters of High Color Rendering Index LED

YANG Yuming¹, LI Yan¹, ZHOU Tianliang², ZHENG Huaiwen¹,
YANG Hua¹, YI Xiaoyan¹, WANG Junxi¹, LI Jinmin¹

(1. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences; Research and Development Center for Solid State Lighting, Institute of Semiconductors; University of Chinese Academy of Sciences; Beijing Engineering Research Center for the 3rd Generation Semiconductor Materials and Application, Beijing 100083, China;
2. College of Material, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to improve the color rendering of LED light sources, it is generally necessary to change different phosphor components. Theoretically, the phosphor ratios of different peaks can be used to achieve similar color temperature and color rendering index. In this respect, the convenience brought by its diversity, has made it difficult for us to carry out experiments related to photobiological effects. We use a typical blue LED, three different peak wavelength green/yellow-green phosphors and a typical red phosphor to combine five basic spectra. The colorimetric parameters for each combination include color coordinates, correlated color temperature, and general color rendering index. The index was simulated and the relationship between the technical scheme and color rendering at similar color temperature was statistically analyzed. The results show that the color temperature and color rendering index can better determine the

基金项目: 国家重点研发计划(批准号: 2017YFB0403705)

通信作者: 杨华, E-mail: huayang@semi.ac.cn

overall shape of the white LED spectrum under this technical scheme, and the higher color rendering index can better constrain the ratio that can be used.

Key words: color rendering index; phosphor; spectrum; LED

引言

随着半导体照明技术在照明市场的渗透率逐步提高,在技术上对照明光源的控制能力不断提升,这也使得人们对照明的健康属性愈加关注^[1-4],其中高显色指数的 LED 照明光源在教室照明,桌面照明,电视转播照明等领域有着广泛的应用,高显指白光 LED 的常见技术方案为蓝光激发绿光段和红光段荧光粉,多家制造商也提出了不同的技术方案^[5-8],这也是未来照明光源品质提升的重要方向。一般来说,为了提高 LED 光源的显色性一般需要在传统蓝光加黄绿荧光粉的基础上增加一些不同发射光谱的荧光材料^[9,10],在理论上利用配比不同峰值发射光谱的荧光粉可以实现类似的色温和显色指数,这一方面为我们设计和使用更多的约束条件带来的便利,同时也由于其多样性为我们开展光生物效应相关的实验增加了难度。因此,确认当前技术条件下的高显色指数 LED 的主要光谱配比对于健康照明研究具有重要的参考价值。

为了简要地分析上述问题,本文选取了 5 种典型的蓝光二极管和红/绿/黄绿色荧光粉进行不同配比的白光 LED 光谱光色特性仿真研究,结合不同的基本光谱比例优化相关色温和显色性等指标,对获得相近色温和显色性的比例关系进行研究并考察其光谱形态。

1 仿真设置

研究中使用的蓝光 LED 的发射光谱,峰值波长为 455 nm,半高宽为 25 nm。荧光材料的发射光谱如图 1 所示,其中包括 4 种典型荧光材料分别为 (SrBa)Si₂O₂N₂:Eu、Sr₂SiO₄:Eu、Intematix GNYAG572、(SrCa)AlSiN₃:Eu,计算采用的峰值波长和发射光谱半宽照顾了代表性,依次为 495 nm、535 nm、572 nm、630 nm,半宽分别为 35 nm、60 nm、120 nm、85 nm。

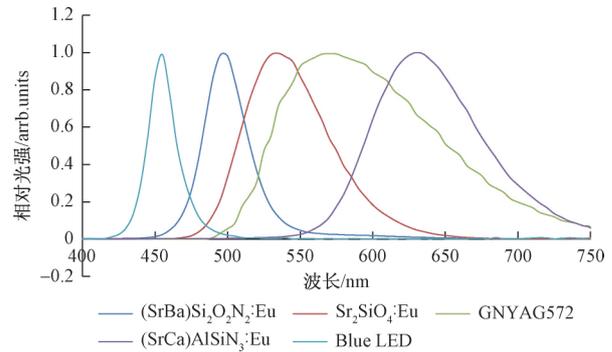


图 1 仿真实验用的 5 种基本光谱

Fig. 1 Five basic spectra for simulation experiments

2 仿真计算过程

采用以上蓝光 LED 发射光谱、三种绿/黄绿荧光粉发射光谱、一种红光荧光粉发射光谱共 5 种光谱为基本光谱功率分布函数,以 1/10 强度为步长,共有 $11^5 = 161\ 051$ 种强度分布组合,光谱范围为 390 ~ 750 nm,间隔为 5 nm。按照式 (1) 计算合成光谱:

$$\text{SPD}_{\text{total}}(\lambda) = \sum_{i=1}^5 k_i \cdot \text{SPD}_i(\lambda) \quad (1)$$

其中 $\text{SPD}_{\text{total}}$ 是计算色度参数所用总光谱, k_i 是每个基本光谱的比例, SPD_i 是基本光谱, λ 是波长。通过 Matlab 计算工具对每一个合成光谱分别计算色度参数,具体包括利用三刺激值计算 CIE1931 色坐标 (x, y) ,利用 McCamy 公式计算相关色温 CCT,参考 CIE 015—2018 计算一般显色指数 R_a 。最终将计算得到的相关色温、显色指数及对应的光谱强度比例输出到结果文件进行统计和分析。

3 结果分析

1) 分别在色坐标图上采用描点法绘制出 2 700 K、4 000 K、5 000 K、5 500 K、6 500 K 附近 100 K 范围的满足 R_a 要求的色坐标位置。可以看到不同配比合成光谱的色坐标范围基本为该色温附近的带状分布,同时显色指数的提高使得可能的光谱

配比向黑体曲线靠近。

对于相关色温在 $(2\ 700 \pm 50)$ K 范围的情况如图 2 所示,当显色指数从 70~75 范围提高到 90~95 范围,其色坐标所在带状区域的两端也从 $(0.428\ 9, 0.395\ 6)$ 与 $(0.495\ 6, 0.470\ 6)$ 区间缩小到

$(0.451\ 8, 0.399\ 7)$ 与 $(0.471\ 5, 0.425\ 0)$ 区间。在这一色温条件下没有光谱配比能够使 R_a 达到 95 以上,在这个色温条件下 R_a 在 90 以上的配比其色坐标没有跨越黑体曲线,这表明在实际工艺中该色温得到 R_a 达到 90 以上的光谱配比存在困难。

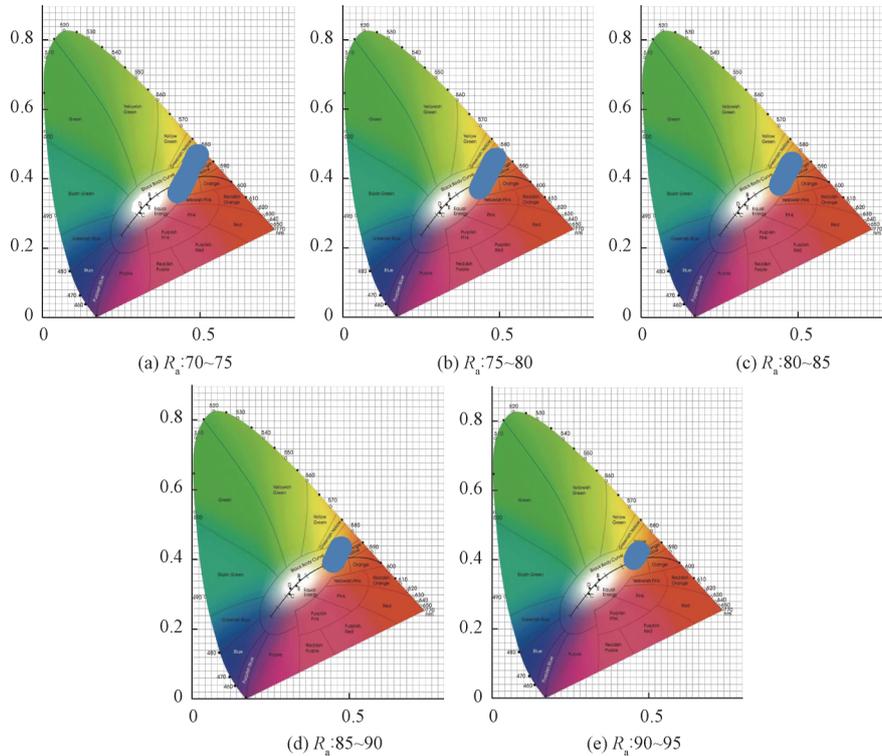


图 2 相关色温 $2\ 700\ K \pm 50\ K$ 时,满足一般显色性要求的配比在色坐标图上的位置分布

Fig. 2 The color coordinate distribution of spectral ratio under different general color rendering index, when the correlated color temperature is $2\ 700\ K \pm 50\ K$

对于相关色温在 $4\ 000\ K \pm 50\ K$ 范围的情况如图 3 所示,当显色指数从 70~75 范围提高到 90~95 范围,其色坐标所在带状区域的两端也从 $(0.362\ 9, 0.314\ 8)$ 与 $(0.403\ 0, 0.451\ 4)$ 区间缩小到 $(0.374\ 9, 0.359\ 5)$ 与 $(0.388\ 6, 0.400\ 0)$ 区间。在这一色温条件下 R_a 在 90~95 范围内不同配比的色坐标跨越黑体曲线,这表明在实际工艺中对该配比进行实验优化可能使其满足色温和显色指数要求,而满足 R_a 大于 95 要求的配比虽然仍有一定的数量,但是其与黑体曲线有一定的偏离,限制了其实际的应用。

对于相关色温在 $5\ 000\ K \pm 50\ K$ 范围的情况如图 4 所示,当显色指数从 70~75 范围提高到 90~95 范围时,其色坐标所在带状区域的两端也从 $(0.3397, 0.2964)$ 与 $(0.3538, 0.4326)$ 区间缩小到 $(0.3431, 0.3415)$ 与 $(0.3490, 0.3793)$ 区

间。显色指数的提高同样使得可能的光谱配比减少并整体上向黑体曲线靠近,而满足 R_a 大于 95 要求的配比虽然有一定的数量,但是整体仍然存在与黑体曲线的少量偏离,在实际应用中需要进一步进行优化实验。

对于相关色温在 $5\ 500\ K \pm 50\ K$ 范围的情况如图 5 所示,同样的当显色指数从 70~75 范围提高到 90~95 范围时,其色坐标所在带状区域的两端也从 $(0.3318, 0.3042)$ 与 $(0.3335, 0.4309)$ 区间缩小到 $(0.3314, 0.3509)$ 与 $(0.3337, 0.3656)$ 区间。同时其满足 R_a 大于 95 要求的配对应应的色度坐标整体仍然存在与黑体曲线的少量偏离,在实际应用中需要进一步优化的优化实验。

对于相关色温 $6\ 500\ K$ 的情况如图 6 所示,当显色指数从 70~75 范围提高到 90~95 范围时,其

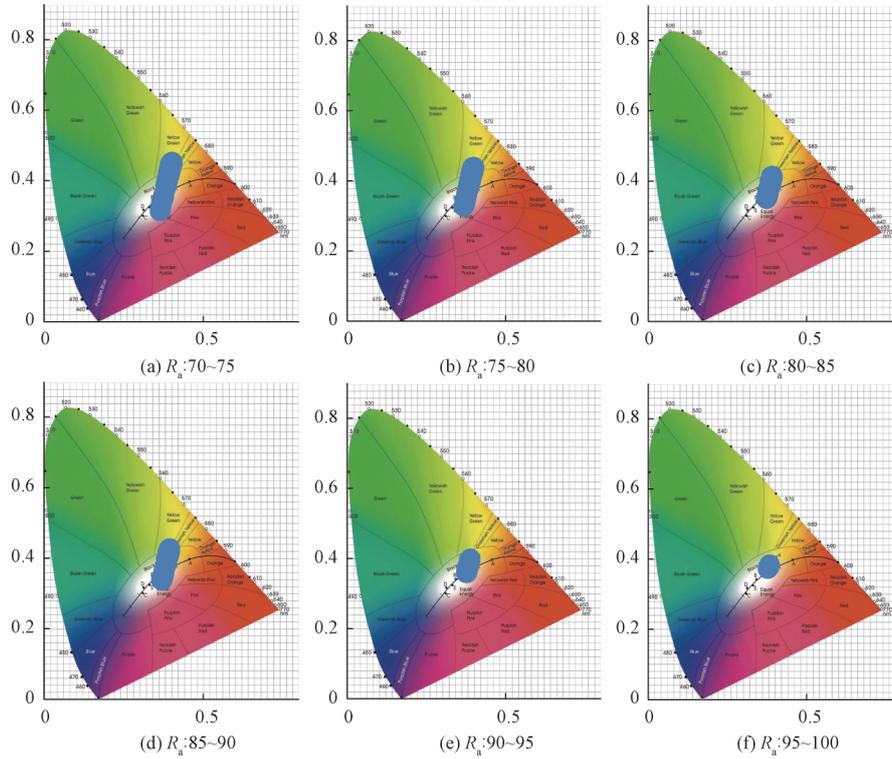


图 3 相关色温 $4\ 000\ K \pm 50\ K$ 时, 满足一般显色性要求的配比在色坐标图上的位置分布

Fig. 3 The color coordinate distribution of spectral ratio under different general color rendering index ,when the correlated color temperature is $4\ 000\ K \pm 50\ K$

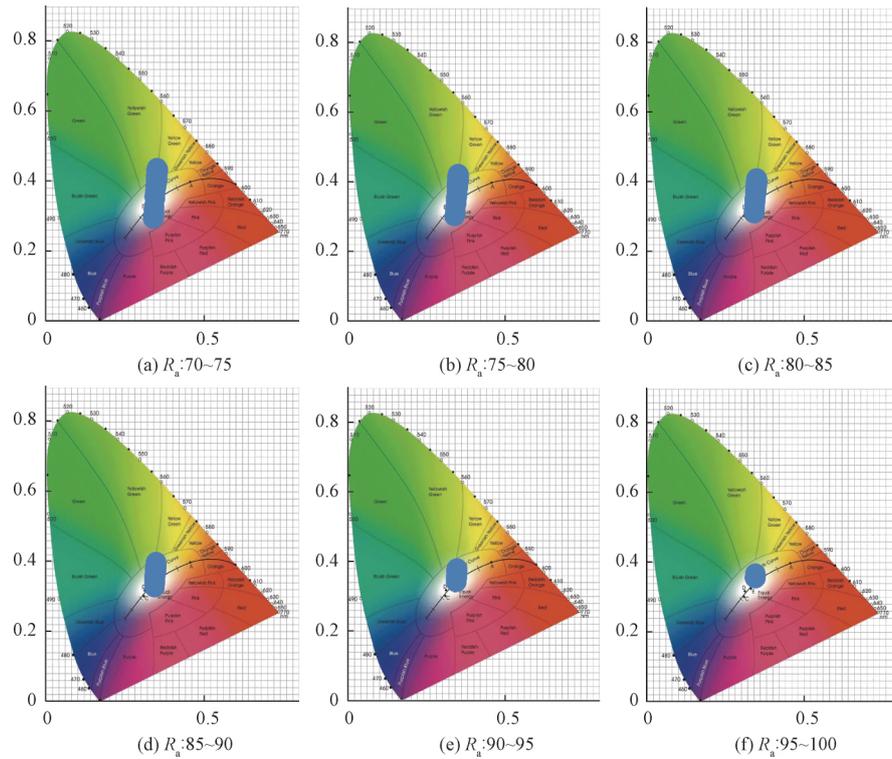


图 4 相关色温 $5\ 000\ K \pm 50\ K$ 时, 满足一般显色性要求的配比在色坐标图上的位置分布

Fig. 4 The color coordinate distribution of spectral ratio under different general color rendering index ,when the correlated color temperature is $5\ 000\ K \pm 50\ K$

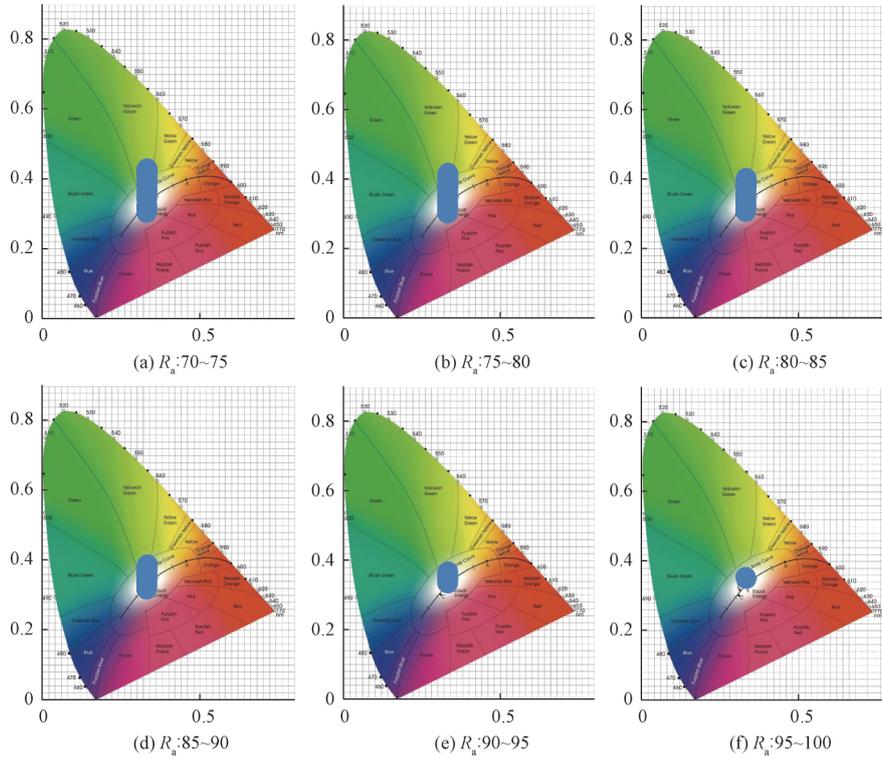


图5 相关色温 $5500\text{ K} \pm 50\text{ K}$ 时, 满足一般显色性要求的配比在色坐标图上的位置分布

Fig. 5 The color coordinate distribution of spectral ratio under different general color rendering index, when the correlated color temperature is $5500\text{ K} \pm 50\text{ K}$

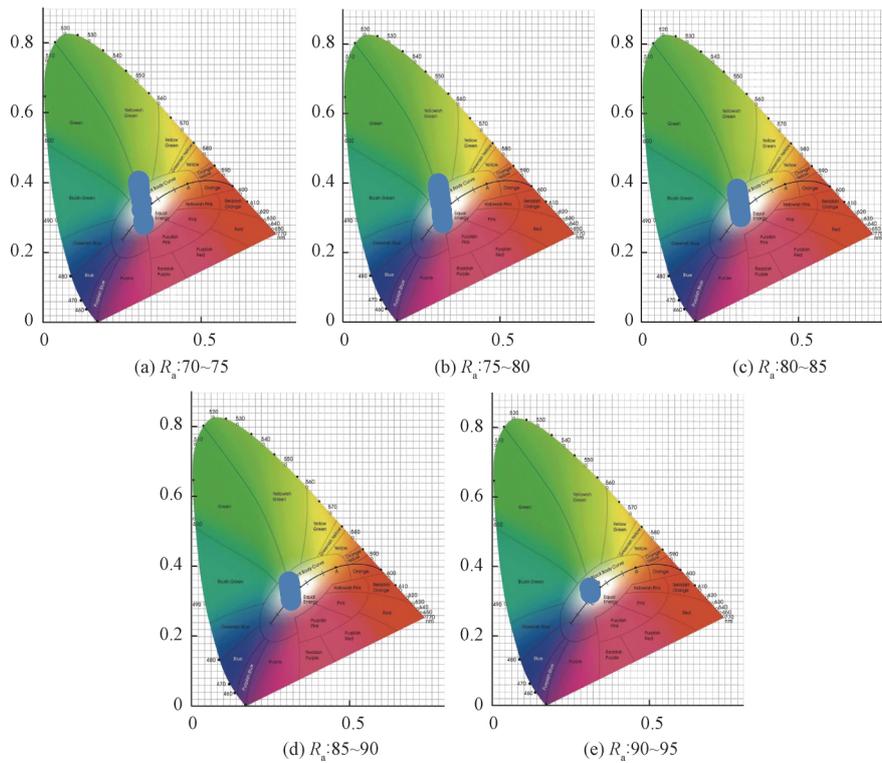


图6 相关色温 $6500\text{ K} \pm 50\text{ K}$ 时, 满足一般显色性要求的配比在色坐标图上的位置分布

Fig. 6 The color coordinate distribution of spectral ratio under different general color rendering index, when the correlated color temperature is $6500\text{ K} \pm 50\text{ K}$

色坐标所在带状区域的两端也从 (0.301 6, 0.401 3) 与 (0.319 9, 0.280 3) 区间缩小到 (0.310 6, 0.340 3) 与 (0.313 2, 0.322 7) 区间。和 2 700 K 的情况类似, 在这个色温条件下也没有 R_a 大于 95 的光谱配比, 同时在这个色温条件下 R_a 在 90 以上的配比其对应色坐标没有跨越黑体曲线, 表明在实际工艺中该色温得到 R_a 达到 90 以上的光谱配比存在一定困难。

2) 统计以上计算得到的数据, 不同色温下和一般显色指数所对应的配比数量关系如图 7 所示, 其中相关色温限制了光谱配比的最高数量, 在同一组相关色温范围内, 显色指数的提高可以大幅度的限制光谱配比的可能性, 如在显色指数大于 95 的条件下, 2 700 K 和 6 500 K 没有适当的配比, 4 000 K 有 11 个组合, 5 000 K 有 8 个组合, 5 500 K 有 4 个组合。当然, 图 7 所示的高显色指数配比并不能满足全部色度指标要求, 但这一结果说明了在一定的色度条件下, 更高的显色指数要求会显著地限制可能选取的光谱配比。但是在显色指数从低到高增加的过程中, 相关色温 2 700 K 的情况存在一定特殊性, 其光谱配比数量先增加后减少, 这说明本文所选基本光谱在这一色温段更易于实现较高的显色指数。

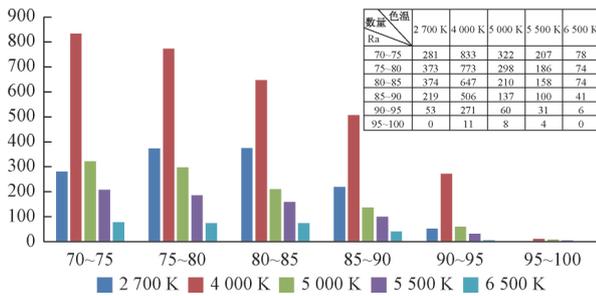


图 7 不同相关色温、显色指数与光谱配比数量的关系
Fig. 7 Relationship between correlated color temperature, color rendering index and the counts of spectral ratios

3) 在全部计算结果中筛选出一般显色指数大于 60 的 104 810 个配比并在色坐标图上绘制出其配比数量与色坐标的关系 (如图 8 所示), 其中相近的色坐标对应的光谱配比数量在 (0.36, 0.46) 左右达到峰值, 在色度图上 (0.01 × 0.01) 的面积内有近 1 200 个配比, 该配比密度在峰值周边较快的下降, 这一趋势与 2) 中的描述基本相当。

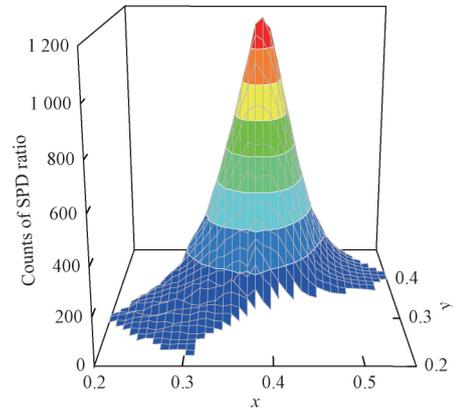


图 8 显色指数大于 60 的光谱配比在色坐标 (x, y) 上的数量分布图
Fig. 8 Distribution of the counts of spectral ratios on color coordinates (x, y) with the color rendering index greater than 60

4 结论

我们对提高 LED 光源的显色性所需要的的荧光粉成分及其强度配比进行了仿真研究, 在不考虑不同荧光粉之间再吸收的条件下, 采用典型的蓝光 LED、3 种不同峰值波长的绿色/黄绿色荧光材料与典型红色荧光材料进行 5 种基本光谱的 11^5 (161 051) 种组合的分析, 对每种组合的色度学参数包括色坐标、相关色温、显色指数等进行了仿真计算, 并对相近色温下的技术方案和显色性的关系进行了统计和分析。结果表明, 在一个特定基本光谱组合方案下, 更高的显色指数可以更好的约束光谱组合所能采用的配比, 色度图上的配比数量密度与基本光谱相关。该结果一方面为我们设计和开发高显色指数 LED 提供了指导, 另一方面也为我们健康光源研究中引入其他约束条件具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 郝洛西, 曹亦潇, 崔哲, 等. 光与健康的研究动态与应用展望 [J]. 照明工程学报, 2017, 28 (6): 1-15.
- [2] 蔡建奇, 高伟, 郭娅, 等. 健康照明的基础研究和标准研制的探讨 [J]. 照明工程学报, 2017, 28 (6): 24-28.
- [3] 郭琳, 张昕. 健康光环境的范围界定与标准衔接问题 [J]. 照明工程学报, 2017, 28 (6): 38-41.
- [4] 王晓静, 段延龙, 牟同升, 健康照明的评价方法及其标准化的新进展 [J]. 照明工程学报, 2017, 28 (6): 29-34.

(下转第 98 页)

差与质感的对于光谱的多样性的要求不如有色宝石及透明质感的宝石高。

6 总结

本试验选用 12 种不同峰值波长的单色光 LED 芯片制作了一款 LED 组装灯, 该灯的光谱模拟了 4 500 K 下的太阳光谱。利用该组装灯和市场上常见的珠宝展柜灯对 10 种多彩宝石进行重点照明, 同时测量宝石在 LED 组装灯下、普通珠宝展柜灯下和自然太阳光下的反射光谱。提出了一种匹配程度的标准 E , 用于评价珠宝灯光谱与日光光谱的相似程度。计算发现, 当采用普通珠宝展览灯时, E 平均值为 1.255 2; 当采用 12 路 LED 组装灯时, E 平均值降低至 0.201 6, 可见组装光谱对多彩宝石的复现程度是非常良好的。募集 6 名被试参与主观试验, 评价指标为色差感和珠宝在光线下的表达质感。在主观性实验中的数据证明除了托帕石、黑玛瑙及珍珠, 其他的多彩宝石在组装灯下的评定结果中要显著优于传统珠宝灯下。说明 LED 类太阳光谱珠宝灯在提高珠宝的颜色饱和度, 质感表达和减低色差方面表现优异, 值得在商业照明中予以推广。

参考文献

[1] 程雯婷, 孙耀杰, 童立青, 等. 白光 LED 颜色质量评

价方法研究 [J]. 照明工程学报, 2011, 22 (3): 37-42.

- [2] Shogo Kohraku, Kosuke Kurokawa. New methods for solar cell measurement by LED solar simulator [C]. Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of, World Conference on. IEEE, 2003: 1977-1980 Vol. 2.
- [3] 杨吉. 宝石矿物的呈色机理 [J]. 世界地质, 2002, 21 (2): 28.
- [4] Sun C. Sensitive physiological indicators for human visual comfort evaluation [J]. Lighting Res. Technol, 2016, 48: 726.
- [5] Eickhorst M. 有色宝石的最佳照明 [J]. 宝石和宝石学杂志, 2003, 3 (12): 38.
- [6] 陈科生. 世界不同产地红宝石和蓝宝石的典型包体特征和鉴定 [J]. 珠宝科技, 1993, 2: 21-23.
- [7] 李立平, 陈华, 罗劬侃. GemDialogue 和 Gemset 颜色系统在有色宝石颜色描述和分级中的应用 [J]. 宝石和宝石学杂志, 2005, 7 (1): 20.
- [8] 黄敏, 廖宁放, 徐艳芳. 基于中国颜色体系的色差公式分析 // 2006 中国科协年会《数字成像技术及影像材料科学》学术交流会议论文集, 2006.
- [9] 刘浩学. CIE 均匀颜色空间与色差公式的应用 [J]. 北京印刷学院学报, 2003, 11 (3): 7.
- [10] 许向阳, 陈广学, 高媛. 色温及亮度可调的四基色 LED 混合白光的方法研究 [J]. 影像科学与光化学, 2018, 6 (3): 507.

(上接第 87 页)

- [5] FRYC I, BROWN SW, EPPELDAUER GP, et al. A spectrally tunable solid-state source for radiometric, photometric, and colorimetric applications [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5530: 150-159.
- [6] FRYC I, BROWN SW, OHNO Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source // Fifth International Conference on Solid State Lighting [C]. Proc. of SPIE 2005, 5941.
- [7] BROWN SW, RICE JP, NEIRA J E, et al. Spectrally Tunable Sources for Advanced Radiometric Applications [J]. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 2006, 111: 401-410.
- [8] LIU Jay Guoxu, TANG Wei, QIN Yonghao, et al.

Quantitative Analysis of Full Spectrum LEDs for High Quality Lighting // 2018 IEEE Proceedings: 15th China International Forum on Solid State Lighting: International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS), Pages 95-99 (DOI: 10.1109/IFWS. 2018.8587355).

- [9] 赵洪涛, 安雪娥, 李明金, 等. 荧光粉对白光 LED 色温和显色指数影响的研究 [J]. 照明工程学报, 2013, 24 (3): 69-72.
- [10] 黄婷, 郭震宁, 林介本. 基于高显色指数白光 LED 的混色研究 [J]. 照明工程学报, 2016, 27 (5): 94-99.