



全光谱LED技术研究进展

裘金阳, 陈磊, 王新中, 林金填

引用本文:

裘金阳, 陈磊, 王新中, 等. 全光谱LED技术研究进展[J]. *发光学报*, 2020, 41(2): 199–207.

QIU Jin-yang, CHEN Lei, WANG Xin-zhong, et al. Research Progress of Full Spectrum LED[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(2): 199–207.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204102.0199>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全光谱照明LED中的蓝绿色荧光粉研究

Blue-green Phosphors in Full Spectrum Lighting LEDs

发光学报. 2018, 39(9): 1220–1224 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183909.1220>

LED背光液晶屏的低色温调节及光谱分析

Low Color Temperature Adjustment and Spectral Analysis of LED Backlit LCD

发光学报. 2019, 40(12): 1531–1537 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194012.1531>

基于PWM调光的高显色性白光LED混光优化方法

Optimization Dimming Method of Mixed Light for White Light Emitting Diode with High Color Rendering Index Based on Pulse Width Modulation

发光学报. 2019, 40(12): 1538–1545 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194012.1538>

红、绿CdSe@ZnS量子点配比对三波段标准白光LED器件的影响

Effect of Red, Green CdSe@ZnS Quantum Dots Ratios on Standard Three-band White LED Devices

发光学报. 2014, 35(8): 992–997 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143508.0992>

基于荧光玻璃的高效LED白光技术

High-efficiency Technology of LED White Light Based on Phosphor Glass

发光学报. 2016, 37(6): 637–643 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163706.0637>

文章编号: 1000-7032(2020)02-0199-09

全光谱 LED 技术研究进展

裘金阳^{1,2}, 陈磊³, 王新中^{1*}, 林金填⁴

(1. 深圳信息职业技术学院 电子与通信学院, 广东 深圳 518172; 2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;
3. 深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057; 4. 旭宇光电(深圳)股份有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要: 全光谱 LED 具有光谱和太阳光可见光光谱相似度高、色彩饱和度和保真度高、显色指数接近 100 且无蓝光危害等优点, 被认为是未来半导体照明技术的一个主流方向。本文从全光谱 LED 的概念和特性着手, 简述了全光谱 LED 方案相较于传统方案的优越性; 阐述了目前主流的全光谱 LED 方案及存在的问题; 最后, 分别从新型荧光粉的开发和多基色全光谱的合成两个方面介绍了研究者们关于完善光谱和简化流程所做的工作, 并对未来全光谱 LED 的应用做出了设想。

关键词: 全光谱; 混色; 显色指数; 色温

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20204102.0199

Research Progress of Full Spectrum LED

QIU Jin-yang^{1,2}, CHEN Lei³, WANG Xin-zhong^{1*}, LIN Jin-tian⁴

(1. School of Electronic Communication Technology, Shenzhen Institute & Information Technology, Shenzhen 518172, China;
2. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China;
4. Xuyu Optoelectronics(Shenzhen) Co., LTD., Shenzhen 518101, China)

* Corresponding Author, E-mail: xzwang868@163.com

Abstract: Full-spectrum LED has the advantages of high spectral similarity with the visible spectrum of sunlight, high color saturation and fidelity, close to 100 color rendering index and no blue light hazard, and is considered as a mainstream direction of semiconductor lighting technology in the future. Starting from the concept and characteristics of full-spectrum LED, this paper describes the advantages of full-spectrum LED scheme compared with the traditional scheme. The mainstream full-spectrum LED schemes and existing problems are described. Finally, the work done by the researchers in perfecting the spectrum and simplifying the process is introduced from two aspects of the development of new phosphors and the synthesis of multi-color full spectrum. And the application of full spectrum LED in the future is envisaged.

Key words: full-spectrum; mixture; color rendering index; color temperature

收稿日期: 2019-09-16; 修订日期: 2019-10-19

基金项目: 广东省自然科学基金(2017A030313337); 广东省高等职业院校珠江学者岗位计划(2016); 深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20160509100737182); 创新强校工程(2017GKCXTD007)资助项目
Supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province(2017A030313337); Pearl River Scholar Post Plan Funding Project of Guangdong Higher Vocational and Technical Colleges(2016); Shenzhen Science and Technology Plan Basic Research Project(JCYJ20160509100737182); Project of Innovation and Strong School(2017GKCXTD007)

1 引 言

半导体发光二极管 (Light emitting diode, LED) 被称为第三代照明光源, 具有节能、环保、寿命长、体积小等特点, 其产品已经普遍应用于日常照明和显示领域^[1-6]。目前, 通常采用蓝光芯片搭配黄色荧光粉 (YAG: Ce³⁺) 或采用蓝光芯片激发绿色荧光粉和红色荧光粉^[7-8] 实现白光 LED。其中, 采用蓝光芯片激发黄色荧光粉实现白光 LED 由于光谱缺乏红色组分, 显色指数一般都在 70 左右^[9-10]。而采用蓝光芯片激发绿色荧光粉和红色荧光粉实现白光 LED, 其显色指数能够达到 80 或 90 以上。

近年来, 随着一些专业照明领域对 LED 产品提出了高品质的要求^[11], 全光谱 LED 的概念应运而生, 其具有光谱和太阳光可见光光谱相似度高、色彩饱和度和保真度高、显色指数接近 100 且无蓝光危害等优点^[12], 被认为是未来半导体照明技术的一个主流方向。

全光谱 LED 作为一种新型的白光实现方案近年来得到了快速的发展, 在教育照明、植物照明、商业照明、医疗照明、博物馆照明、相机补光灯等众多专业领域都得到了广泛的应用, 但还是存在着一些问题需要解决, 例如目前的全光谱要实现真正的太阳光谱还存在一定的技术壁垒, 紫外和远红光及红外部分仍存在一定的光谱缺失, 且光效仍需进一步地提升。本文重点介绍了全光谱 LED 概念、标准、关键技术问题及如何进一步优化全光谱 LED 的光谱功率、光谱连续性及覆盖范围, 提升全光谱 LED 的显指和光效是目前研究的热点。

2 全光谱 LED 的概念与特性

2.1 全光谱 LED 的概念

全光谱是指光谱波长范围覆盖可见光、并包含少量红外光和紫外光的连续光谱, 同时要求光谱图中各段波长的比例相对均衡, 显色指数接近 100 ($R_a > 97$, $CRI > 95$, $R_1 \sim R_{15} > 90$)。太阳光就是自然界中典型的全光谱, 目前研究者们普遍致力于模拟 5 000 K 太阳光谱来实现全光谱^[13]。如图 1 所示为光谱能量分布图 (Spectral power distribution, SPD), 现有技术实现的光谱分布与太阳光谱仍然存在较大差距, 特别是在蓝绿光波段有着较大的缺失。

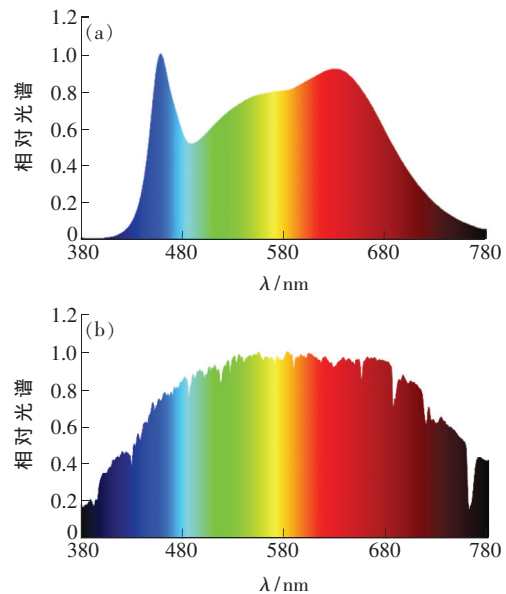


图 1 现有技术全光谱与太阳光谱全光谱对比图。(a) 现有技术全光谱: 蓝光芯片 + 黄色荧光粉 (YAG: Ce³⁺) + 添加黄绿色荧光粉 (Ga-YAG) + 红色荧光粉 (氮化物荧光粉); (b) 太阳光全光谱。

Fig. 1 Comparison of present SPD and solar SPD. (a) Present full spectrum SPD (yellow phosphor + green phosphor + red phosphor). (b) Solar SPD.

2.2 全光谱 LED 的特性

目前业内普遍认为全光谱 LED 应同时具有以下特性: 光谱覆盖范围宽, 类太阳光光谱, 高色彩饱和和逼真度, 优异的显色性, 低蓝光危害。

其中宽光谱可以通过短波和长波荧光粉搭配使用得到, 例如使用蓝绿色荧光粉搭配绿色荧光粉及红色荧光粉就能在可见光区域得到较宽的波谱。与此同时, 也有部分研究者着手于超宽光谱荧光粉的研究。

光源的显色性^[14]就是指一个光源反映物体真实颜色的能力, 目前普遍采用 CIE 于 1965 年提出的“测验色”法来评价光源的显色性。该方法采用显色指数来表示光源的显色性, 设定参照光源的显色指数为 100。用待测光源照明 CIE 某标准色板 ($i = 1 \sim 15$), 再用与该白光光源色温相同的标准光源照明该色板, 如图 2 所示为各标准色板图。

其中色板所呈现的颜色的差异 ($\Delta \sum E_i$) 表征该白光光源的显色性, 并用特殊显色性指数 R_i 表示:

$$R_i = 100 - 4.6 \times \Delta E_i, \quad (1)$$

R_i	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	R_9	R_{10}	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}
代表颜色	浅灰红色	暗灰黄色	饱和黄绿色	中等黄绿色	浅蓝绿色	浅蓝色	浅紫色	浅红紫色	饱和红色	饱和黄色	饱和绿色	饱和蓝色	西方妇女肤色	中等程度的橄榄绿色	黄种人肤色
颜色															

图 2 $R_1 \sim R_{15}$ 标准色块图Fig. 2 Standard color card of $R_1 - R_{15}$

常规 LED 的评价标准通常都是一般显色指数 R_a :

$$R_a = \left(\sum_1^8 R_i \right) / 8, \quad (2)$$

评价全光谱 LED 的显色性时,同时对一般显色指数 R_a 和特殊显色指数 R_i 提出了要求,目前行业普遍认为全光谱 LED 需要同时满足以下显色性要求:

一般显色指数: $R_a > 95$; 特殊显色指数: $R_1 \sim R_{15} > 90$ 。

普通 LED 光谱中蓝光波段能量较大,长时间照射会对人体产生蓝光危害:导致视网膜损伤、抑制褪黑色素、导致睡眠紊乱和一系列内分泌失调^[15]。全光谱 LED 通过提升红光和绿光波段的光谱能量,降低了蓝光的光谱能量占比,有效抑制了富蓝光带来的蓝光危害。应用在教育场景和办公场景中能有效缓解人员视力疲劳,减少对视网膜的伤害。

3 全光谱 LED 现有技术及其优缺点

3.1 紫光全光谱

紫光全光谱方案采用近紫外 LED 芯片激发三基色荧光粉来实现全光谱^[16-17]。一般选用波长为 405 ~ 420 nm 的 UVA 芯片,搭配蓝色荧光粉(铝酸盐荧光粉)、黄绿色荧光粉(Ga-YAG)、红色荧光粉(氮化物荧光粉),最终得到如图 3 所示的较为平缓的“象背型”光谱图,其光谱和太阳光可见光谱相似度高于 95%。

该方案使用蓝色荧光粉激发蓝光波段,在抑制蓝光和补齐靛色(480 nm 附近的蓝光)方面更加优异,同时,紫光芯片的使用又使其光谱补齐了短波紫光的部分,光谱连续性更好^[18],更接近太阳光谱。但是该方案也存在一些弊端,首先,由于 UV 芯片自身的局限性,会存在价格较高,光电转

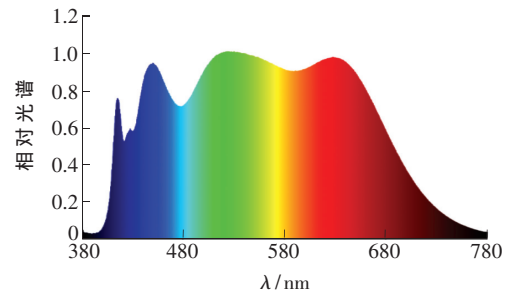


图 3 紫光全光谱图

Fig. 3 Spectral figure of near UV chip emitted full spectrum LED

换效率相对较低的问题;其次,目前蓝色荧光粉的外量子效率较低且可靠性仍需进一步提升,应用于大功率产品时容易导致光衰,并存在色漂移较大的问题。

3.2 蓝光全光谱

蓝光全光谱方案其实更像是常规白光 LED 方案的升级版,在传统白光 LED“蓝光芯片 + 黄色荧光粉(YAG: Ce³⁺)”的基础上,添加黄绿色荧光粉(Ga-YAG)和红色荧光粉(氮化物荧光粉),补足了常规 LED 光谱中绿光波段和红光波段的波谷,如图 4(a)所示。但是,芯片所在的 450 nm 波段和绿色荧光粉激发的 495 nm 波段之间仍然存在一个明显的深沟。基于上述问题,赵方仪等^[19]通过添加氮氧化物蓝绿色荧光粉 BaSi₂O₂N₂: Eu²⁺ 来弥补这一缺陷,取得了较好的效果。研究多种波段蓝光芯片和荧光粉之间的耦合技术,也是实现 LED 光谱高连续性、获得高品质全光谱 LED 的关键技术。图 4(b)为采用双蓝光技术实现 LED 的光谱图,该方案光谱连续性较好,且短波蓝光强度较低。

蓝光激发全光谱相对紫光激发全光谱具有成本低、光效高、易于产业化等优点。但同时也存在不足之处:色温较高时短波蓝光的抑制作用不明

显;480~490 nm 左右的靛色部分荧光粉的量子效率和稳定性需要进一步改进;采用双蓝光激发方案,其光谱效果相对单蓝光具有较大提升。

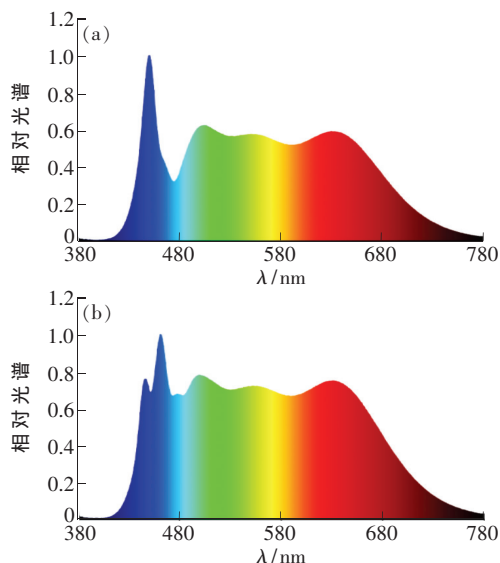


图 4 蓝光全光谱图。(a)单蓝光全光谱图;(b)双蓝光全光谱图。

Fig. 4 Spectral figure of blue light chip emitted full spectrum LED. (a)Single blue light peak full spectrum SPD. (b)Double blue light peaks full spectrum SPD.

4 提高全光谱 LED 品质的研究方法

目前主流的全光谱 LED 实现方案都存在着各自的不足,距离理想的太阳全光谱仍然有较大的差距。研究者们试图从不同方面着手,以期进一步提升其光谱质量。

4.1 全光谱用荧光粉的研究

荧光粉决定了 LED 的光谱形状,根据基质体系的不同,白光 LED 荧光粉可以分为铝酸盐体系荧光粉、硅酸盐体系荧光粉、氮化物及氮氧化物体系荧光粉等^[20-21]。

铝酸盐体系荧光粉具有亮度高、发射峰宽、成本低等优点,应用较为广泛,研究最为成熟,目前一系列的工作正致力于该体系荧光粉的改性,从而提升荧光粉的热猝灭性能和亮度^[22]。典型代表就是日亚化学公司于 1996 年开发的 Ce^{3+} 激活钇铝石榴石($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, 简称 YAG)黄粉。硅酸盐基质体系荧光粉具有发射光谱覆盖较宽、化学稳定性较高等优点,但是对湿度较为敏感,不耐高温,目前已报道的硅酸盐荧光粉基质主要包括 $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 : \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Sr}_2\text{SiO}_4 : \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{LiSrSiO}_4 : \text{Eu}^{2+}$ 、

$\text{Ca}_2\text{Sc}_3\text{Si}_3\text{O}_{12} : \text{Eu}^{2+}$ 、 $\text{Sr}_3\text{SiO}_5 : \text{Ce}^{3+}$ 等^[23-24]。稀土离子激活金属氮化物/氮氧化物体系的发光材料具有激发波段宽、发射颜色多样、热稳定性和化学稳定性好、无污染等优点,已成为国内外研究的热点,主要包括 $\text{MAlSiN}_3 : \text{Eu}^{2+}$ ($M = \text{Sr}, \text{Ca}$)、 $\text{MSiN}_2 : \text{Eu}^{2+}$ ($M = \text{Ca}, \text{Sr}$)、 $\text{M}_2\text{Si}_5\text{N}_8 : \text{Eu}^{2+}$ ($M = \text{Sr}, \text{Ca}, \text{Ba}$) 等^[25],但是由于这类荧光粉研究起步较晚,其晶体结构变化和荧光性能调控方面仍需深入研究。

为了降低全光谱 LED 配制难度,并提升其光谱质量,部分研究者对全光谱用荧光粉展开了研究。当前,超宽带荧光粉的开发作为其中一条研究思路已经开展了许多重要工作。Dai 等^[26]用 BO_3 阴离子代替 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ 中的 PO_4 阴离子使其晶格发生畸变,合成的 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_{3-x}(\text{BO}_3)_x\text{Cl} : 0.04\text{Eu}^{2+}$ 荧光粉在 446 nm 和 550 nm 处均存在发射峰,如图 5 所示,可以实现可见光内的可调谐发射,其超宽的发射光谱为开发高显色指数的白光荧光粉提供了一条重要的捷径。Li 等^[27]合成了一种新型的 $\text{Sr}_2\text{AlSi}_2\text{O}_6\text{N}$ 荧光粉,其具有 230 nm 的超宽发射光谱,使用该单相荧光粉制作的白光 LED 展现了优异的颜色质量 ($R_a = 97$, $R_o = 91$)。Wang 等^[28]利用高温固态反应方法合成了单离子活化的单相白光荧光粉 $\text{Ba}_2\text{Y}_3(\text{SiO}_4)_3\text{F} : \text{Eu}$,在 350 nm 紫外光激发下,荧光粉在 470 nm 和 600 nm 处出现两个主要的宽谱带,激活离子在基质晶格中的不同占位导致了多个发射峰的出现。

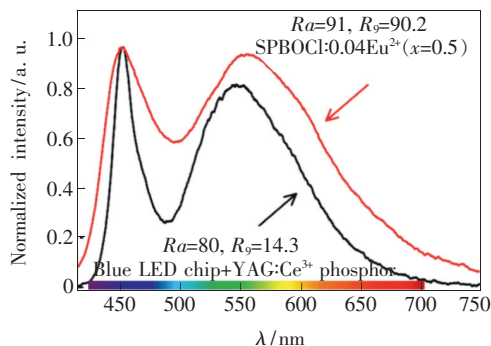


图 5 $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_{2.5}(\text{BO}_3)_{0.5}\text{Cl} : 0.04\text{Eu}^{2+}$ (红线)和 YAG: Ce^{3+} (黑线)LED 光谱

Fig. 5 PL spectrum of $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_{2.5}(\text{BO}_3)_{0.5}\text{Cl} : 0.04\text{Eu}^{2+}$ phosphor under excitation at 365 nm (red line). Electroluminescence spectrum of the commercial YAG: Ce^{3+} -based WLED is also plotted as a reference.

由于缺少相应的荧光粉,目前的全光谱方案在靛色部分存在着一个难以消除的凹陷区域。针对上述现象,有研究者致力于开发新型荧光粉来对靛色波段进行补偿,为全光谱用荧光粉的研究提供了另一条思路。Yan 等通过高温固态反应方法研制出了峰值波长在 469 nm 附近的青色荧光粉 $\text{YScSi}_4\text{N}_6\text{C}:\text{Ce}^{3+}$, 可以用来填充光谱中缺失的靛色部分,适用于全光谱的配比^[29]。实验结果显示,该荧光粉和 $\text{YScSi}_4\text{N}_6\text{C}:\text{Ce}^{3+}$ (蓝色荧光粉)、 $\beta\text{-sialon}:\text{Eu}^{2+}$ (绿色荧光粉)、 $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ (红色荧光粉) 搭配使用,并用近紫外芯片 ($\lambda_{\text{em}} = 405 \text{ nm}$) 激发能得到 CRI 为 94.7 的高显指白光器件。 $(\text{Sr}, \text{Ba})_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}:\text{Eu}^{2+}$ 型荧光粉具有独特的光谱可调特性,但是其调节机理尚不明确。Fang 等^[30] 综合分析了其阳离子空位电荷补偿和挤出机理,提出了适用于全光谱的 $\text{Sr}_{3.4}\text{Ba}_{1.3}\text{Eu}_{0.3}(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$ 荧光粉,能填补光谱中 480 ~ 520 nm 的蓝绿色波谷。

紫光激发全光谱 LED 中,提供蓝光波段的蓝色荧光粉是必不可少的。目前普遍采用 Eu^{2+} 掺杂的氯磷酸盐和铝酸盐荧光粉,这些荧光粉发射峰的半峰宽 (Full width at half maximum, FWHM) 大体上在 20 ~ 60 nm 之间,并且其最佳激发波长小于 370 nm,不利于提升 LED 的光效和显指。Chen 等^[31] 通过单源前驱体分解方法制备了介孔氢氧化铝型蓝色荧光粉,测试发现其具有较高的量子产率和较宽的半峰宽,使用该荧光粉组装的白光 LED 器件同时具有较高的光效和显色指数。

除了传统的荧光粉,还有部分研究者也开始着眼于量子点在全光谱 LED 上的应用。量子点 (Quantum dot, QD) 是一种纳米尺寸的半导体粒子,具有优异的光电性能。其作为光致发光材料时,发射光的波长取决于其粒径的大小,因此以量子点为发光体的 LED (QLED) 可以获得接近连续光谱的特性,在全光谱领域有着广阔的应用前景。Zhong 等^[32] 使用量子点制备出了同时满足高显色指数、高出光效率的各色温段白光 LED 器件,在 2 700 ~ 6 500 K 色温之间, CRI 达到了 95, $\text{LER} \geq 300 \text{ lm/W}$, 其光谱如图 6 所示。

OSRAM 公司在 2019 年 5 月推出了商业化 QLED 产品,使得 CRI 为 90 的器件在 3 000 K 色温时光效能达到 173 lm/W 。

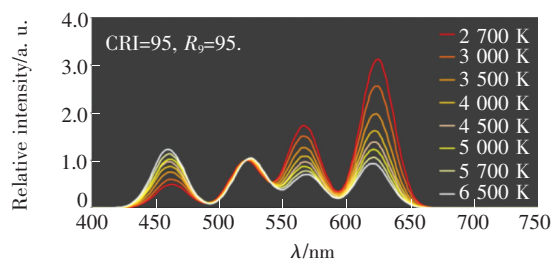


图 6 CRI = 95、 $R_9 = 95$ 的 QD-LED 白光 SPD。

Fig. 6 Optimal relative SPDs of QD-WLEDs with CRI = 95 and $R_9 = 95$

4.2 多基色全光谱的研究

全光谱 LED 对显色性提出了更高的要求,在白光 LED 方案中使用更多的基色能有效提升器件的显色水平。但是引用了更多的基色之后由于其众多的单色光谱,也会使得在配置高显色指数白光 LED 时需要更加复杂的遍历计算和调试配比的过程,在现实的合成过程中较为困难,不利于最终的产业应用。为此,研究者们提出了各种方案,力求在尽可能简化配置难度的基础上提升器件的光谱质量。

Lin 等^[33] 设计了一种色温可调的优化光学性能的白光 LED 模型: R 组,直接激发的红光芯片; pc-Y 组,蓝光芯片激发绿色和橙色荧光粉; pc-C 组,蓝光芯片激发绿色荧光粉,如图 7 所示。该方案的本质其实就是将蓝、绿、橙、红的四基色问题简化成了三基色问题,简化了计算和调试过程。通过调整上述 3 组基色的比例,在 2 731 ~ 6 533 K 色温之间实现了 $R_a \geq 98$, 大部分 $R_i \geq 95$ 。但是这种方法得到的光谱图在蓝光和红光波段明显存在难以消除的尖峰,如图 8 所示。

柳丝婉等^[34] 提出了九基色光谱合成全光谱

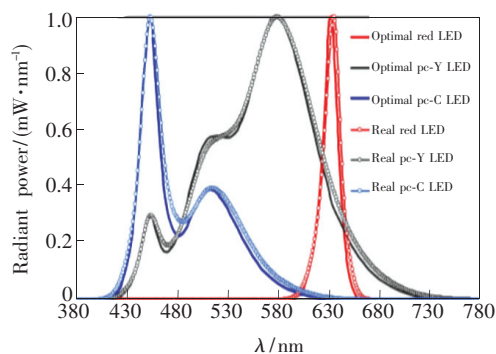


图 7 R 组、pc-Y 组、pc-C 组模拟和真实光谱图。

Fig. 7 Optimal and real relative SPDs of red LED, pc-Y LED and pc-C LED.

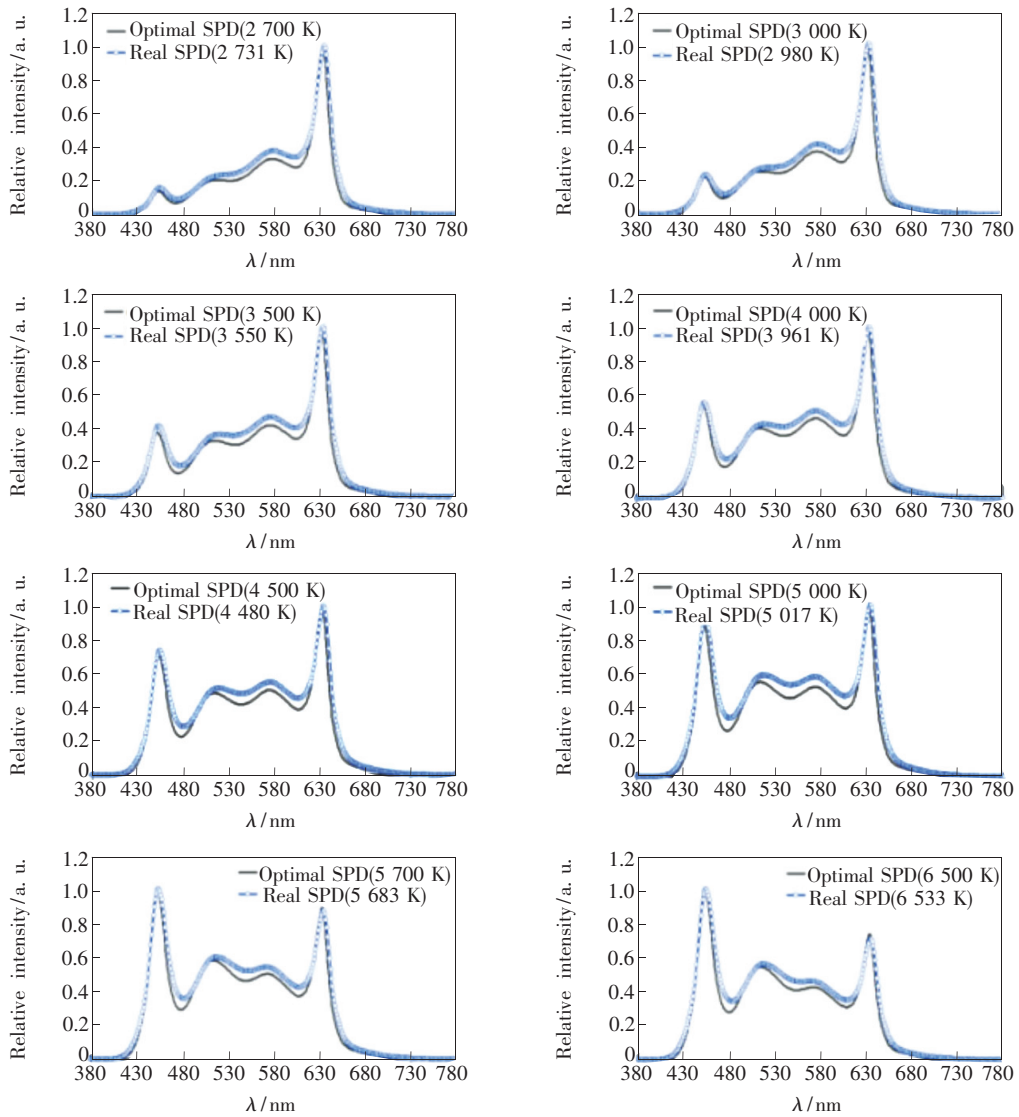


图 8 不同色温的模拟 SPD 和真实 SPD

Fig. 8 Relative SPDs of optimal and real R/Y/C white LED cluster at different CCTs

白光 LED 的方案,初始光谱包括紫、蓝、青 3 种 LED 芯片和浅绿、黄绿、黄色、橙色、红色、深红 6 种荧光粉。同时还提出了内三角法和同色异谱法来计算各基色的比例。最后两种九基色合成法得

到的白光光谱 Ra 均高达 98 以上,其光谱能量分布如图 9 所示。

汤露瑶等^[35]使用 15 种不同峰值波长的 LED 单色光芯片,模拟了色温在 3 000 ~ 6 000 K 范围

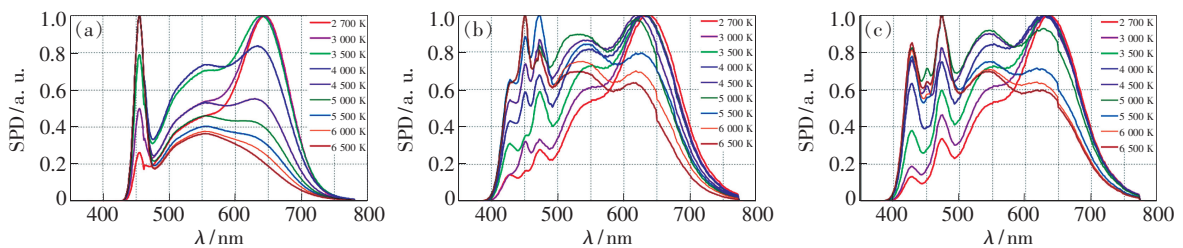


图 9 不同方法得到的全光谱白光 SPD。(a)三基色合成得到的白光 SPD;(b)内三角法得到的全光谱白光 SPD;(c)同色异谱法得到的全光谱白光 SPD。

Fig. 9 SPDs of three methods' full spectrum LED. (a) White light SPD synthesized by tri-primary color method. (b) White light SPD synthesized by inner triangle method. (c) White light SPD synthesized by metamerism method.

内的太阳光谱。他们基于最小二乘法提出了一种评估组装光谱和目标太阳光谱相似程度的数学模型:

$$E = \frac{\sum_{380}^{780} [S_T(\lambda) - \sum_{i=1}^n K_i S_i(\lambda)]^2}{(\sum_{380}^{780} S_T(\lambda))^2}, \quad (3)$$

其中 E 为总光谱失配评价指数, $S_T(\lambda)$ 为目标光谱分布, $S_i(\lambda)$ 为 LED 光谱分布, K_i 为功率系数。并通过计算机模拟仿真来确定 LED 功率参数组合。最终得到与太阳光谱类似的白光光源, 如图 10 所示。

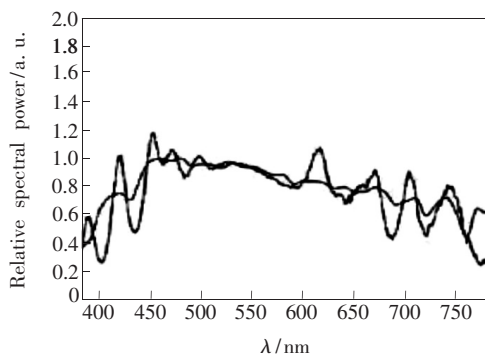


图 10 用 13 种 LED 模拟 6 000 K 太阳光谱图

Fig. 10 13 LED simulate solar SPD at CTT of 6 000 K

4.3 健康照明和智慧照明的实现

根据有关报道, 不同色温的光能够刺激视网膜细胞, 使大脑做出相应的指令, 从而影响人的生物钟和激素分泌, 会对人体健康产生一定的影响。为了实现健康照明, 有学者提出了光色可调的全

光谱 LED 方案, 可以模拟从早到晚不同色温的自然光。Zhang 等^[36] 在 CCT = 3 183 K 的全光谱 LED 的基础上, 经过光谱叠加的计算机模拟仿真后, 加入主波长分别为 634.1, 513.9, 456.2 nm 的 LED 器件, 在不同时间段驱动不同的 LED 器件进行光色组合, 在 2 719 ~ 6 497 K 的色温范围内取得了 CRI 高于 93 的全光谱器件。

也有学者选择把全光谱 LED 和照明控制技术、调光模块、无线 IP、移动 APP 等相关技术结合, 提出了一套完整的软硬件结合的系统体系结构, 为当前的智慧化城市提供一种具体、可实现的照明系统方案^[37]。

5 结 论

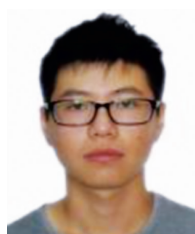
本文分别从发光材料的研究和增加基色数量两方面提升现有全光谱 LED 方案的品质。但是其最终效果距离真正的色温可调太阳光全光谱还有一定差距, 荧光粉的热稳定性、可靠性、特殊波段荧光粉的开发仍需进一步的提升; 增加基色完善光谱的方案也仍然存在计算过程复杂的问题, 还需要进一步研究。接下来的研究热点将着眼于配置出更接近太阳光全光谱的同时, 消除太阳光谱中紫外等有害波段, 实现更健康的照明。同时, 全光谱 LED 还将与控制系统相结合, 在各使用场景下根据需求智能改变出光品质, 实现智慧照明。总而言之, 随着材料技术的发展、工艺的进步以及与控制系统的结合, 这种新型照明光源将在未来得到更广泛的应用。

参 考 文 献:

- [1] KOMINE T, NAKAGAWA M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. *IEEE Trans. Consumer Electron.*, 2004, 50(1):100-107.
- [2] PIMPUTKAR S, SPECK J S, DENBAARS S P, et al.. Prospects for LED lighting [J]. *Nat. Photon.*, 2009, 3(4): 180-182.
- [3] ŽUKAUSKAS A, SHUR M S, GASKA R. *Introduction to Solid-state Lighting* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- [4] SCHUBERT E F, KIM J K. Solid-state light sources getting smart [J]. *Science*, 2005, 308(5726):1274-1278.
- [5] LIU S, LUO X B. *LED Packaging for Lighting Applications: Design, Manufacturing and Testing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] LUO X B, HU R, LIU S, et al.. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications [J]. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2016, 56:1-32.
- [7] 胡运生. 高显色低色温白光 LED 荧光粉的改性及光色搭配研究 [D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2014. HU Y S. *Study on Modification and Light Color Matching of White LED Phosphor Powder with High Color Display and Low Color Temperature* [D]. Beijing: General Research Institute for Nonferrous Metals, 2014. (in Chinese)

- [8] WIERER JR J J, TSAO J Y, SIZOV D S. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2013, 7(6):963-993.
- [9] BANDO K, SAKANO K, NOGUCHI Y, *et al.*. Development of high-bright and pure-white LED lamps [J]. *J. Light Visual Environ.*, 1998, 22(1):1_2-1_5.
- [10] 辛易, 李琪. YAG 荧光粉在白光 LED 封装中的应用 [J]. 中国照明电器, 2015, (4):12-14.
XIN Y, LI Q. Application of YAG phosphors in white LED packaging [J]. *China Light Light.*, 2015, (4):12-14. (in Chinese)
- [11] 党睿, 卜燕慧, 王卿臣, 等. 基于视觉舒适度的商场照明问题分析 [J]. 照明工程学报, 2018, 29(3):12-16.
DANG R, BU Y H, WANG Q C, *et al.*. Analysis of artificial lighting problems in shopping malls based on visual comfort [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2018, 29(3):12-16. (in Chinese)
- [12] HE G X, ZHENG L H. White-light LED clusters with high color rendering [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(17):2955-2957.
- [13] KOLBERG D, SCHUBERT F, LONTKE N, *et al.*. Development of tunable close match LED solar simulator with extended spectral range to UV and IR [J]. *Energy Procedia*, 2011, 8:100-105.
- [14] 刘义成. 光源的显色性与显色指数 [J]. 电子器件, 2000, 23(1):43-50.
LIU Y C. Color-rendering properties and color-rendering index of light source [J]. *J. Electron Dev.*, 2000, 23(1):43-50. (in Chinese)
- [15] 冯荣标, 陈涛, 陈伟, 等. 高显色全光谱 LED 特性及其对解决蓝光危害的贡献 [J]. 光源与照明, 2016(1):7-10.
FENG R B, CHEN T, CHEN W, *et al.*. Characteristics of high-color full-spectrum LED and its contribution to solving blue light hazards [J]. *Lamps Light.*, 2016(1):7-10. (in Chinese)
- [16] PENG Y, LIANG R L, MOU Y, *et al.*. Progress and perspective of near-ultraviolet and deep-ultraviolet light-emitting diode packaging technologies [J]. *J. Electron. Packag.*, 2019, 141(4):040804-1-11.
- [17] LIN H, HU T, CHENG Y, *et al.*. Glass ceramic phosphors: towards long-lifetime high-power white light-emitting-diode applications—a review [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2018, 12(6):1700344.
- [18] 李琪, 辛易. 全光谱 LED 发展现状及应用前景 [J]. 中国照明电器, 2017(3):12-16.
LI Q, XIN Y. Advancement and trends of full spectrum LED [J]. *China Light Light.*, 2017(3):12-16. (in Chinese)
- [19] 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 Ultr-high color rendering index and full spectrum white LED [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2019, 30(3):75-80. (in Chinese)
- [20] 赵昕冉, 傅仁利, 宋秀峰, 等. 白光 LED 用硅基氮(氧)化物荧光转换材料的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(5):965-972.
ZHAO X R, FU R L, SONG X F, *et al.*. Research progress in silicon-based (oxy) nitride phosphors for white LED [J]. *Bull. Chin. Ceram. Soc.*, 2009, 28(5):965-972. (in Chinese)
- [21] RONDA C R, JÜSTEL T, NIKOL H. Rare earth phosphors: fundamentals and applications [J]. *J. Alloys Compd.*, 1998, 275-277:669-676.
- [22] MA X L, ZHUANG W D, GUOH J, *et al.*. Effect of Si—N substituting for Al—O bonds on luminescence $\text{Sr}_3\text{AlO}_4\text{F}:\text{Ce}^{3+}$ phosphor [J]. *J. Rare Earths*, 2014, 32(5):399-403.
- [23] QIAN F J, FU R L, AGATHOPOULOS S, *et al.*. Synthesis and luminescence properties of a broad-band red phosphor $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ for warm white light-emitting diodes [J]. *J. Lumin.*, 2012, 132:71-75.
- [24] PARK J K, CHOI K J, YEON J H, *et al.*. Embodiment of the warm white-light-emitting diodes by using a Ba^{2+} codoped $\text{Sr}_3\text{SiO}_5:\text{Eu}$ phosphor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(4):043511-1-3.
- [25] LE TOQUIN R, CHEETHAM A K. Red-emitting cerium-based phosphor materials for solid-state lighting applications [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2006, 423(4-6):352-356.
- [26] DAI P P, LI C, ZHANG X T, *et al.*. A single Eu^{2+} -activated high-color-rendering oxychloride white-light phosphor for white-light-emitting diodes [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2016, 5(2):e16024.
- [27] LI S X, XIA Y H, AMACHRAA M, *et al.*. Data-driven discovery of full-visible-spectrum phosphor [J]. *Chem. Mater.*, 2019, 31(16):6286-6294.
- [28] WANG J M, LIN H, HUANG Q M, *et al.*. Structure and luminescence behavior of a single-ion activated single-phased

- Ba₂Y₃(SiO₄)₃F:Eu white-light phosphor [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2017,5(7):1789-1797.
- [29] YAN C P, LIU Z N, ZHUANG W D, *et al.*. YSeSi₄N₆C:Ce³⁺—a broad cyan-emitting phosphor to weaken the cyan cavity in full-spectrum white light-emitting diodes [J]. *Inorg. Chem.*, 2017,56(18):11087-11095.
- [30] FANG M H, NI C C, ZHANG X J, *et al.*. Enhance color rendering index *via* full spectrum employing the important key of cyan phosphor [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2016,8(45):30677-30682.
- [31] CHEN B K, SUSHA A S, RECKMEIER C J, *et al.*. Mesoporous aluminum hydroxide synthesized by a single-source precursor-decomposition approach as a high-quantum-yield blue phosphor for UV-pumped white-light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2017,29(1):1604284-1-7.
- [32] ZHONG P, HE G X, ZHANG M H. Optimal spectra of white light-emitting diodes using quantum dot nanophosphors [J]. *Opt. Express*, 2012,20(8):9122-9134.
- [33] LIN D Y, ZHONG P, HE G X. Color temperature tunable white LED cluster with color rendering index above 98 [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2017,29(12):1050-1053.
- [34] 柳丝婉, 李福生, 韩秋漪, 等. 九基色合成全光谱白光 LED 的两种算法 [C]. 2018 年中国照明论坛——半导体照明创新应用暨智慧照明发展论坛论文集, 绍兴, 2018.
- LIU S W, LI F S, HAN Q Y, *et al.*. Two algorithms for full spectrum white LED synthesis with nine primary colors [C]. 2018 *China Lighting BBS—Collection of BBS Papers on Innovative Application of Semiconductor Lighting and Intelligent Lighting Development, Shaoxing*, 2018. (in Chinese)
- [35] 汤露瑶, 苏成悦, 陈少藩, 等. 用多种 LED 单色光芯片模拟太阳光谱的一种光谱组装算法及相似度评价标准 [J]. *照明工程学报*, 2017,28(5):4-9.
- TANG L Y, SU C Y, CHEN S F, *et al.*. A spectral assembly algorithm and mismatch evaluation index for simulating solar spectra using a variety of LED monochromatic optical chips [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2017,28(5):4-9. (in Chinese)
- [36] ZHANG M H, CHEN Y, HE G X. Color temperature tunable white-light LED cluster with extrahigh color rendering index [J]. *Sci. World J.*, 2014,2014:897960-1-6.
- [37] 吴睿. 智慧照明系统研究与实现 [D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- WU R. *Research and Implementation of Intelligent Lighting System* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)



裘金阳(1996 -),男,浙江嵊州人,硕士研究生,2018 年于华中科技大学获得学士学位,主要从事深紫外 LED 器件封装方面的研究。
E-mail: JinyangQiu96@163.com



王新中(1979 -),男,安徽安庆人,博士,教授,2009 年于中国科学院获得博士学位,主要从事半导体发光材料与器件方面的研究。
E-mail: xzwang868@163.com