

# 高显色指数 LED 灯的设计

曹宇杰 金尚忠 岑松原

(中国计量学院现代计量测试技术及仪器重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 针对目前室内照明用发光二极管(LED)灯显色性的不足,提出一种解决方案,采用 3 种不同类型的 LED 共同构成 LED 灯的发光模块。通过程序计算 3 种 LED 各自使用不同数目时的 LED 发光模块的色温、显色指数和光效。分析了每种 LED 使用数目的变化对结果的影响,同时以色温为 3800 K 和 4800 K 的结果为例对优化组合的选择加以说明,并从大量的结果中优选了不同色温下(3400 K~5600 K)显色指数(均在 90 左右)和光效都较为理想的组合结果。与其他提高白光 LED 显色指数的方法相比,本方案更易于实现,且更适用于室内照明灯具。该研究结果为 LED 灯在满足优质照明对显色性的要求方面提供了一个发展方向。

**关键词** 光学设计;发光二极管;色度学;显色指数;模拟

**中图分类号** TN312.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1222002

## Design for LED Lamps with High Color Rendering Index

Cao Yujie Jin Shangzhong Cen Songyuan

(Modern Measurement and Testing Technology and Instruments Laboratory, China Jiliang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** Aiming at the insufficiency of color rendering of existing light-emitting diode (LED) based lamps used for indoor lighting, a solution of LED modules consisting of three different kinds of LED is proposed. Correlated color temperature (CCT), color rendering index (CRI) and luminous efficiency (LER) of LED modules are calculated when different numbers of three kinds of LED are set respectively. Influences of changing the number of each kind of LED on the results are analyzed. Besides, the selections of optimized combinations are described by setting results on CCT values of 3800 K and 4800 K as examples. Moreover, ideal results with high CRI (90 around) as well as good LER on different CCT values (3400 K~5600 K) are acquired. This solution is easier to impletment and more suitable for indoor lighting lamps compared with other methods used for improving CRI of white LED. This result may provide some guidance for the design of LED-based lamps with satisfying CRI for quality lighting.

**Key words** optical design; light-emitting diode (LED); colorimetry; color rendering index; simulation

**OCIS codes** 220.2945; 230.3670; 330.1690; 330.1730

## 1 引 言

随着发光二极管(LED)技术的不断进步,白光 LED 在光效、寿命以及成本控制等方面取得了长足进展,将其应用于各种照明领域已经成为现实<sup>[1,2]</sup>。LED 照明灯具以其寿命长、结构稳固、省电、无紫外辐射、灯具可塑性强和装饰更美观等优点,逐渐进入人们的视野,被视为替代传统照明光源的第四代照明光源<sup>[3,4]</sup>。

现有 LED 灯,其发光模块多使用蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED。虽然这种 LED 制作工艺成熟、成本低和光效(LER,用  $R_{LE}$  表示)较高,但显色指数并不理想,不能满足优质照明要求。Ohno 等<sup>[5]</sup>模拟计算三基色芯片和四基色芯片 LED 模型得到了低色温(CCT,用  $T_c$  表示)高显色指数(CRI,用  $R_a$  表示)的白光,但是多芯片集成封装为一颗 LED 的结构比较复杂、实现困难、稳定性差和成本

收稿日期: 2011-04-01; 收到修改稿日期: 2011-07-26

基金项目: 国家 863 计划重点项目(2009AA01Z325)资助课题。

作者简介: 曹宇杰(1986—),男,硕士研究生,主要从事 LED 显色性和散热方面的研究。E-mail: cyjzx9012@163.com

导师简介: 金尚忠(1963—),男,教授,硕士生导师,主要从事光纤测温、LED 照明和近红外检测技术研究等方面的研究。

E-mail: jinsz@cjlu.edu.cn

高,此种技术主要用于显示行业。何锦华等<sup>[6]</sup>采用在黄色荧光粉中加入绿光荧光粉的方法得到了  $R_a$  为 86.7 的结果,吴海彬等<sup>[7]</sup>采用在红、绿两种荧光粉的组合得到了  $R_a$  大于 90 的结果,这两种方法的缺点在于常用硫化物红色荧光粉对 LED 芯片有腐蚀作用,且荧光粉转换效率不高,粉体的混合和调配不易。Fukui 等<sup>[8]</sup>采用了近紫外 LED 激发分层的红绿蓝(RGB)荧光粉得到低色温下高显色指数的结果,但是紫外 LED 芯片制备困难、价格昂贵,RGB 荧光粉转换效率不高,且此种 LED 存在紫外辐射的隐患。郑代顺等<sup>[9]</sup>将红光 LED 芯片封装于蓝光 LED 芯片旁边,共同构成一颗 LED,这种封装结构利用红光 LED 芯片补偿了整个 LED 的光谱,得到了高显色指数,但是增加了荧光粉涂敷的难度,同时导致了 LED 驱动电路的复杂化,且温升对不同芯片影响不同,会增大器件的不稳定性。另有 LED 采用在 YAG 荧光粉中加入氮化物红色荧光粉的方法,虽然这种 LED 光效和显色指数较为理想,但是氮化物荧光粉制备困难、价格昂贵,致使成本大大提高,不适合在 LED 灯具里大量使用。

因此,需要一种易于实现、成本较低、适合应用于室内照明且能满足优质照明对高显色指数需求的 LED 灯。本文提出一种解决方案,采用多颗蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED、少许蓝光激发 YAG 荧光粉中加入氮化物红光荧光粉的白光 LED 和少许红光 LED,共同构成 LED 灯的发光模块。考虑到成本控制,同时又要平衡混合光谱中缺少的红光成分,后两种 LED 使用较少的数目。通过程序计算并分析不同组合下 LED 发光模块的显色指数、光效、色温,从中选出不同色温阶段较为理想的结果。

## 2 理论依据

光源的显色性是衡量光源颜色品质的重要参数,其数值化表征为显色指数,它表示物体在该光源照射下表现的颜色与标准光源(太阳光)照射下所表现颜色的相符程度。评价光源的显色指数时采用一套 14 种试验颜色样品,测量、计算第  $i(1 \leq i \leq 14)$  种试验色在参照光源和待测光源下的色差  $\Delta E_i$ , 可求得光源的特殊显色指数分别为<sup>[10,11]</sup>

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

一般显色指数为

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i. \quad (2)$$

通常所说的显色指数是指一般显色指数。在已知待

测光源的相对光谱功率分布  $P(\lambda)$  的情况下,根据国际照明协会(CIE)标准方法可计算出一般显色指数<sup>[12,13]</sup>。

光源的光效用光源辐射出光能量  $\Phi_v$  与输入电能  $P_i$  之比表示,单位 lm/W,表达式为<sup>[11]</sup>

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P_i} = \frac{K_m \int_{380}^{780} P(\lambda)V(\lambda) d\lambda}{P_i}, \quad (3)$$

式中  $V(\lambda)$  为明视觉下光谱光视效率,  $K_m = 683$  lm/W。

(3)式也可以表示为

$$\eta_v = \frac{\int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda}{P_i} \cdot \frac{K_m \int_{\lambda} P(\lambda)V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda}. \quad (4)$$

(4)式右边的两项即

$$R_{LE} = \frac{K_m \int_{\lambda} P(\lambda)V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

$$\eta_e = \frac{\int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda}{P_i}, \quad (6)$$

$\eta_e$  是光源的辐射效率,表示可见光对应的辐射量在输入电能  $P_i$  中所占比例,也称为外量子效率。 $R_{LE}$  是当  $\eta_e = 1$  (对于相对光谱为可见光时,即输入功率全部转换为可见光)时的发光效率,称为光源辐射发光效率或流明效率,其单位为 lm/W,表示光能向流明数的转换效率<sup>[14]</sup>。本文所说发光效率指的即是光源辐射流明效率(LER)。

## 3 程序计算

为模拟计算这种 LED 发光模块的色温、显色指数、光效,LED 基色光谱选择如下公式<sup>[5,15]</sup>:

$$S_{LED}(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = [g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) + 2g^5(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5})]/3, \quad (7)$$

式中  $g(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda_{0.5}) = \exp\{-[(\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda_{0.5}]^2\}$ ,  $\lambda_0$  为峰值波长,  $\Delta\lambda_{0.5}$  为光谱半峰全宽,波长单位为 nm。Ohno 等<sup>[5]</sup>已经验证了此数值模型用于单芯片和多芯片 LED 的适用性。对于荧光粉类 LED,本文实测和模拟了一蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED 的相对光谱功率分布。图 1 所示为实测 LED 光谱,其蓝光峰值波长为 460nm,光谱半峰全宽为 24 nm; YAG 荧光粉的发射峰值波长为 571 nm,光谱半峰全宽为 150 nm,蓝光峰值与黄光峰值的比例

为 1.00:0.44。测得其色温为 6155 K。根据此实测 LED 的峰值波长和光谱半峰全宽数据以及蓝光、黄光峰值比例,利用(7)式可模拟获得相近色温( $\pm 25$  K)下的 LED 光谱。图 2 中虚线所示为模拟光谱,其色温为 6137 K,与实测 LED 色温相差小于 1%,从图中可以看出其光谱曲线形状与实测 LED 的光谱(实线)非常接近。同时,可计算出模拟光谱的色坐标为(0.324, 0.328),与实测 LED 色坐标的误差在 2%以内,在误差允许范围内。该模型也可用于荧光粉类 LED 光谱。

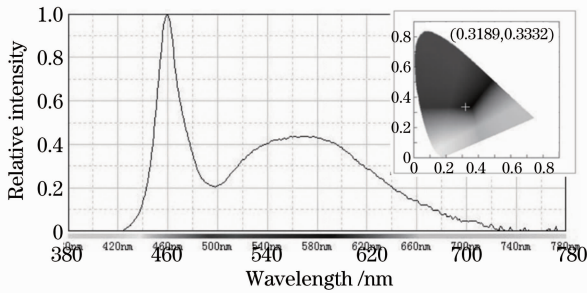


图 1 实测 LED(蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED)的相对光谱功率分布

Fig. 1 Relative spectral power distribution of the measured LED (white LED of blue chip pumping YAG phosphors)

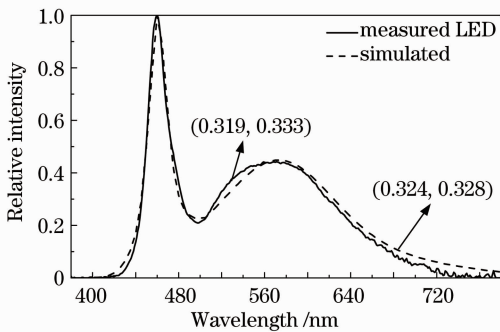


图 2 模拟 LED 与实测 LED 的相对光谱功率分布对比  
Fig. 2 Relative spectral power distribution of simulated LED module compared with real LED

本文选用的 3 种不同 LED 分别记为 A, B, C。其中用于程序计算的 A 类 LED 为蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED,其蓝光峰值波长为 455 nm,光谱半峰全宽为 25 nm;YAG 荧光粉的发射峰值波长为 570 nm,光谱半峰全宽为 150 nm。此种 LED 为构成发光模块的主要元件,使用较多(6~20 颗)。

B 类 LED 为蓝光激发 YAG 荧光粉中再加入氮化物红色荧光粉的白光 LED,其蓝光峰值波长为 455 nm,光谱半峰全宽为 25 nm;YAG 荧光粉的发射峰值波长为 570 nm,光谱半峰全宽为 150 nm;氮化物红色

荧光粉的发射峰值波长为 655 nm,光谱半峰全宽为 70 nm。此种 LED 有较好的显色指数和光效,但是考虑到成本的控制,仅使用少许(1~6 颗)。

C 类 LED 为红光 LED,其峰值波长为 625 nm,光谱半峰全宽为 25 nm。红光 LED 的加入会影响整个 LED 发光模块的光效,使用少许(1~8 颗)。因此,混合光谱的红光成分通过少许的氮化物红色荧光粉和少许红光 LED 得到补偿,并且氮化物红光荧光粉和 C 类 LED 各自的峰值波长和半峰全宽并不相同,即其对混合光谱的贡献不相同,也就是对 LED 灯显色指数的贡献不同。图 3 显示了本次计算所使用的 3 种 LED 的相对光谱功率分布。A 类 LED 的色温为 6174 K, B 类 LED 色温为 4326 K。

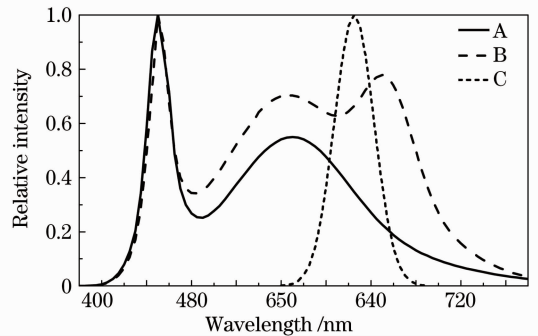


图 3 模拟使用的 3 种 LED(A, B, C)的相对光谱功率分布

Fig. 3 Relative spectral power distributions of three different kinds of LED (A, B, C) which are used for simulation

在实际应用于室内照明灯具时, A 类 LED 分布在外围, B 类和 C 类 LED 交错分布在铝基板或金属传导环氧印刷电路板的中央,置于乳白色灯壳内或者平板后,如图 4 所示。由于加入 C 类 LED 而可能导致的光色均匀性问题,可以通过上述排布和乳白色灯壳解决。根据 3 种不同 LED 的使用数目,从灯壳或者平板漫发射而出的混合光光谱分布可表示为

$$S_{\text{total}}(\lambda) = k_1 S_1(\lambda) + k_2 S_2(\lambda) + k_3 S_3(\lambda), \quad (8)$$

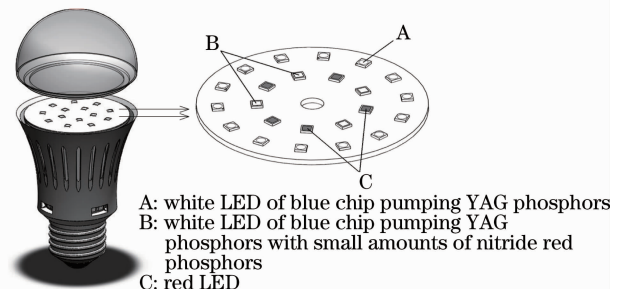


图 4 模拟方案

Fig. 4 Simulation scheme

式中  $k_1$  为 A 类 LED 的使用数目,  $S_1(\lambda)$  对应为 A 类 LED 的光谱功率分布,  $k_2$  为 B 类 LED 的使用数目,  $S_2(\lambda)$  对应为 B 类 LED 的光谱功率分布,  $k_3$  为 C 类 LED 的使用数目,  $S_3(\lambda)$  对应为 C 类 LED 的光谱功率分布。对(8)式进行归一化处理, 即可得到最终混合光的相对光谱功率分布。

### 4 结果与分析

图 5~7 所示为  $k_3=1$ ,  $k_1$  为 6~20,  $k_2$  为 1~6 时的计算结果。总体来说, 随着  $k_1$  的不断增大,  $R_a$  不断降低,  $T_c$  不断升高, LER 不断升高; 随着  $k_2$  的不断增大,  $R_a$  不断升高,  $T_c$  不断降低, LER 不断降低。结果表明, 在 C 类 LED 使用较少的 1 颗时, 随着 A 类 LED 使用数目的增加, 带来的影响是混合光谱中红光成分相对减少, 蓝光和黄光成分相对增加, 从而使得 LED 发光模块的显色指数  $R_a$  不断降低(最低保持在 86 以上), 色温  $T_c$  不断升高, 光效 LER 也不断升高; B 类 LED 的使用可以补偿光谱中的红光成分, 会提高  $R_a$ , 但同时会略微降低  $T_c$  和 LER。

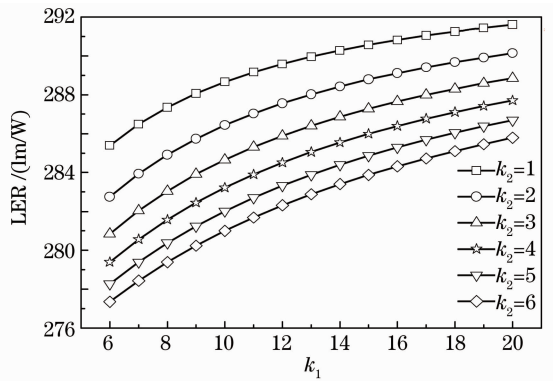


图 7  $k_3=1$  时  $k_1$  和  $k_2$  的变化对 LER 的影响  
Fig. 7 Dependence of LER on  $k_1$  for different  $k_2$  when  $k_3=1$

图 8~10 为  $k_3=6$ ,  $k_1$  为 6~20,  $k_2$  为 1~6 时的计算结果。随着  $k_1$  的不断增大,  $R_a$  先升高后有略微的降低(在  $k_1 > 12$  后), 最后都保持在 90 附近;  $T_c$  不断升高, LER 不断升高。随着  $k_2$  的不断增大,  $R_a$  不断升高, LER 不断降低,  $T_c$  不断升高, 并且在  $k_1=16$  时  $T_c$  不随  $k_2$  改变, 而在  $k_1 > 16$  时  $T_c$  有随  $k_2$  反向变化的趋势。

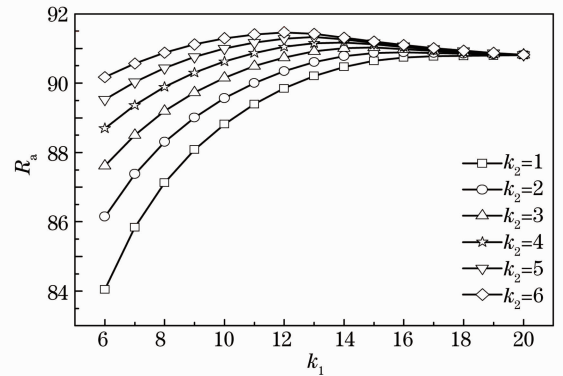


图 8  $k_3=6$  时  $k_1$  和  $k_2$  的变化对  $R_a$  的影响  
Fig. 8 Dependence of  $R_a$  on  $k_1$  for different  $k_2$  when  $k_3=6$

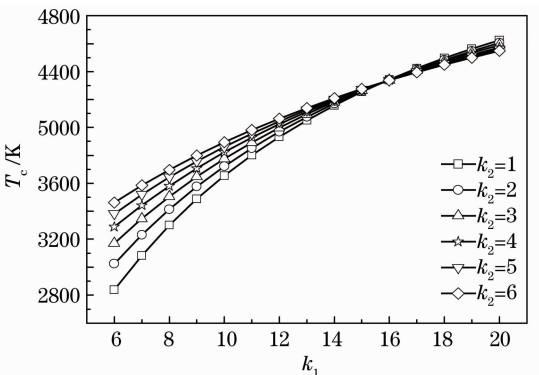


图 9  $k_3=6$  时  $k_1$  和  $k_2$  的变化对  $T_c$  的影响  
Fig. 9 Dependence of  $T_c$  on  $k_1$  for different  $k_2$  when  $k_3=6$

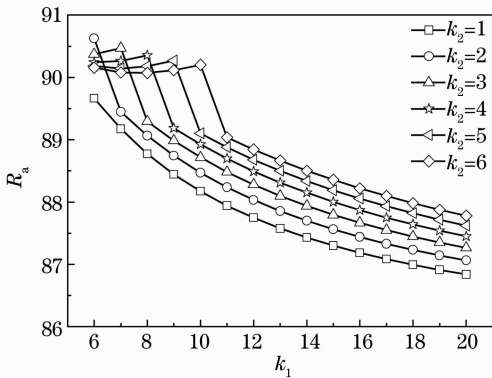


图 5  $k_3=1$  时  $k_1$  和  $k_2$  的变化对  $R_a$  的影响  
Fig. 5 Dependence of  $R_a$  on  $k_1$  for different  $k_2$  when  $k_3=1$

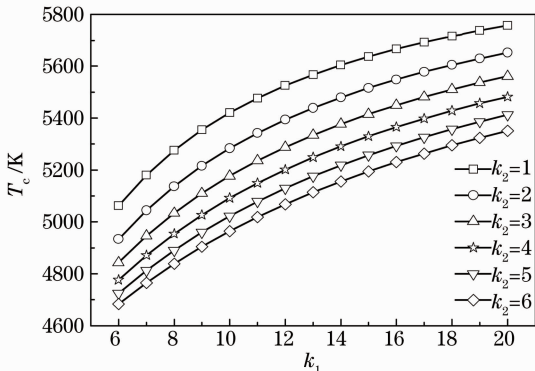


图 6  $k_3=1$  时  $k_1$  和  $k_2$  的变化对  $T_c$  的影响  
Fig. 6 Dependence of  $T_c$  on  $k_1$  for different  $k_2$  when  $k_3=1$

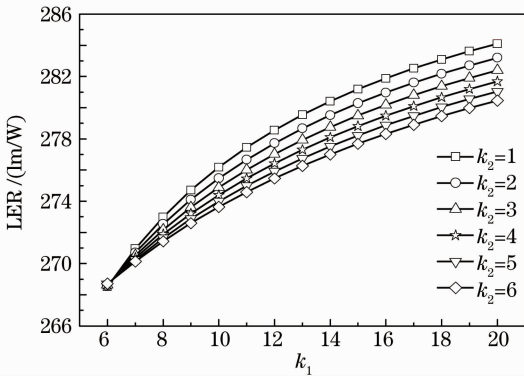


图10  $k_3=6$  时  $k_1$  和  $k_2$  的变化对 LER 的影响  
Fig. 10 Dependence of LER on  $k_1$  for different  $k_2$   
when  $k_3=6$

分别对比图5与图8、图6与图9、图7与图10，可知  $k_3$  从1变为6时，LED发光模块的色温范围从4600 K~5800 K变为2800 K~4600 K，出现了低色温高显色指数，但是光效有所降低。结果表明，由于C类LED使用数目的增加，混合光谱中红光成分的比例增大，使得LED发光模块的  $T_c$  降低，同时使得A类LED和B类LED使用数目的变化对  $R_a$ 、 $T_c$  和 LER 的影响变得复杂。由于  $k_1, k_2, k_3$  的组合较多，计算结果繁多，这里只列出  $k_3=1$  和  $k_3=6$  时  $R_a, T_c$  和 LER 的变化情况。

对于结果的优化选择，需要先确定一个色温值，再从该色温下的所有结果里进行选择。进一步选择时，先找出该色温下  $R_a$  的最大值，选出与  $R_a$  最大值相差在0.05以内的结果，再从这些结果(包括  $R_a$  最大值的结果)中选择 LER 最大值对应的组合作为最优结果；若其他结果与  $R_a$  最大值相差都超过0.05，则以此  $R_a$  最大值对应的组合作为最优结果。下面以  $T_c$  在3800 K和4800 K时的结果为例做分析和说明。

表1所示为色温在3800 K( $\pm 25$  K)的所有结果，可以看出，LED发光模块获得了高显色指数的结果，其  $R_a$  在89~92之间，LER在272~278 lm/W之间。 $R_a$  最大值为91.57，其他结果的  $R_a$  与之相差远超过0.05，选择其对应的组合： $k_1=7, k_2=6, k_3=5$ ，作为色温在3800 K( $\pm 25$  K)的最优结果。同时，还可以从表1中看出，随着A类LED使用数目的增加，要使色温维持在3800 K附近，C类LED的使用数目也必须增加，这种变化规律在表2中也很明显。

表2为色温在4800 K( $\pm 25$  K)的所有结果，同样获得了高显色指数，其  $R_a$  数值都在90.1~90.8之间，LER在280~285 lm/W之间，差别甚小。选

出  $R_a$  最大值为90.81，与之相差在0.05内的结果，共有3组，再从这4组结果中找出 LER 值最大时的组合。因此，选出色温在4800 K( $\pm 25$  K)的最优结果： $k_1=16, k_2=1, k_3=4$ ，其  $R_a$  为90.80，LER为285.2 lm/W。对于表1和表2中LED颗粒总数使用较多的组合，显色指数也较为理想，也可以将其应用于一些对显色指数有一定要求的特定照明器具或者大型室内照明灯具。

表1 色温在3800 K( $\pm 25$  K)附近的计算结果  
Table 1 Calculated results with a CCT value  
close to 3800 K( $\pm 25$  K)

Numbers of three kinds of LED	$T_c$ /K	$R_a$	LER / (lm/W)
$k_1=7, k_2=6, k_3=5$	3788	91.57	272.1
$k_1=8, k_2=4, k_3=5$	3813	90.63	273.6
$k_1=9, k_2=1, k_3=5$	3785	89.43	277.0
$k_1=9, k_2=6, k_3=6$	3799	91.02	272.6
$k_1=10, k_2=4, k_3=6$	3822	90.62	274.4
$k_1=11, k_2=1, k_3=6$	3802	89.39	277.4
$k_1=11, k_2=6, k_3=7$	3809	90.72	273.3
$k_1=12, k_2=4, k_3=7$	3790	90.46	275.0
$k_1=13, k_2=1, k_3=7$	3814	89.37	277.7
$k_1=13, k_2=5, k_3=8$	3783	90.44	274.2
$k_1=13, k_2=6, k_3=8$	3816	90.76	273.9
$k_1=14, k_2=3, k_3=8$	3801	89.94	275.9
$k_1=15, k_2=1, k_3=8$	3823	89.35	278.0

表2 色温在4800 K( $\pm 25$  K)附近的计算结果  
Table 2 Calculated results with a CCT value  
close to 4800 K( $\pm 25$  K)

Numbers of three kinds of LED	$T_c$ /K	$R_a$	LER / (lm/W)
$k_1=7, k_2=5, k_3=1$	4813	90.18	280.4
$k_1=8, k_2=1, k_3=2$	4779	90.81	284.0
$k_1=9, k_2=2, k_3=2$	4822	90.75	283.1
$k_1=10, k_2=4, k_3=2$	4799	90.72	281.3
$k_1=11, k_2=5, k_3=2$	4824	90.44	281.0
$k_1=11, k_2=6, k_3=2$	4786	90.36	280.8
$k_1=12, k_2=1, k_3=3$	4805	90.79	284.8
$k_1=13, k_2=3, k_3=3$	4788	90.70	282.8
$k_1=14, k_2=4, k_3=3$	4813	90.67	282.4
$k_1=15, k_2=6, k_3=3$	4799	90.52	281.3
$k_1=16, k_2=1, k_3=4$	4819	90.80	285.2
$k_1=16, k_2=2, k_3=4$	4779	90.74	284.0
$k_1=17, k_2=3, k_3=4$	4803	90.80	283.5
$k_1=18, k_2=4, k_3=4$	4822	90.74	283.1
$k_1=18, k_2=5, k_3=4$	4792	90.68	282.3
$k_1=19, k_2=6, k_3=4$	4809	90.63	282.1
$k_1=20, k_2=2, k_3=5$	4794	90.75	284.5

本文同时计算了  $k_2=0$  时(即只有 A 和 C)各种组合的情况,在此以色温在 3800 K 和 4800K 的结果与本方案的结果做对比说明。 $k_2=0$  时,色温在 3800 K( $\pm 25$  K)只有 1 组结果: $k_1=15, k_3=8$ ,其  $T_c$  为 3779 K,  $R_a$  为 88.78, LER 为 279.7 lm/W;色温在 4800 K( $\pm 25$  K)有两组结果: $k_1=15, k_3=4$  和  $k_1=19, k_3=5$ ,其  $T_c$  分别为 4792 K 和 4807 K,  $R_a$  分别为 89.82 和 89.84, LER 分别为 287.1 lm/W 和 287.2 lm/W。由此看出  $k_2=0$  时其  $R_a$  略低于本方案, LER 略高于本方案,在得到相同色温的情况下,本方案有较多的组合可选择。相比只有 A 和 C 的组合,加入 B 类 LED 使 LED 发光模块的光谱更加全面,进一步提高了  $R_a$ ,并且在达到更好效果的同时,对于 LED 灯的光效和光色均匀性都有积极的影响。

依据上述对结果的选择策略,可以得到不同色温阶段  $R_a$  和 LER 都较理想的最优结果,如表 3 所示。同时,从表 3 中还可以看出,对应于各个色温阶段,本方案设计的 LED 发光模块相比目前广泛应用的 A 类 LED,虽然 LER 有所降低,但是  $R_a$  的提高都是非常显著的,从 74~81 提高到了 90 左右,甚至更高。图 11 所示为色温在 4000 K 和 5200 K 左右时 LED 发光模块和 A 类 LED 的相对光谱功率分布。显而易见,LED 发光模块拥有更加全面的光谱,尤其是红光成分得到了补偿;而 A 类 LED 则在黄光部分拥有较高比例的光谱。同时还分别计算了表 3 所示不同色温下 LED 发光模块以及 A 类 LED 的色坐标,其中,色温在 4000 K 和 5200 K 时的结果已经表示于图 11 中。对于其他色温阶段的光谱和色坐标均进行了模拟与计算,这里不再一一描述。

表 3 LED 发光模块与 A 类 LED 在不同色温下的结果对比

Table 3 Results of LED modules compared with type A LED at different CCT values

$T_c$ /K		$R_a$		LER/(lm/W)		Numbers of three kinds of LED (LED modules)
A	LED module	A	LED module	A	LED module	
3401	3396	77.74	89.63	295.9	272.7	$k_1=7, k_2=6, k_3=7$
3609	3608	76.76	90.64	299.9	273.4	$k_1=6, k_2=5, k_3=5$
3800	3788	74.93	91.57	309.8	275.1	$k_1=7, k_2=6, k_3=5$
4021	4006	74.69	91.84	307.1	276.2	$k_1=7, k_2=6, k_3=4$
4191	4199	74.57	91.43	308.4	278.5	$k_1=9, k_2=6, k_3=4$
4395	4380	74.74	91.05	308.8	281.2	$k_1=14, k_2=6, k_3=5$
4598	4609	74.65	90.73	311.0	283.3	$k_1=11, k_2=4, k_3=3$
4793	4819	75.72	90.80	310.9	285.2	$k_1=16, k_2=1, k_3=4$
5017	4992	77.84	90.80	306.6	284.0	$k_1=12, k_2=3, k_3=2$
5207	5180	78.66	89.20	304.8	286.5	$k_1=7, k_2=1, k_3=1$
5416	5405	80.32	88.92	299.7	289.2	$k_1=17, k_2=1, k_3=2$
5610	5605	81.79	88.43	296.4	290.3	$k_1=14, k_2=1, k_3=1$

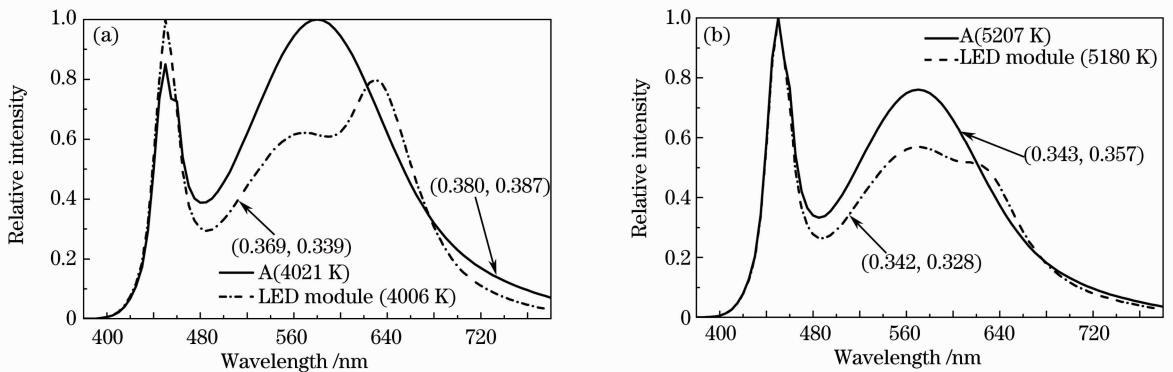


图 11 LED 发光模块和 A 类 LED 在不同色温下的相对光谱功率分布。(a)色温在 4000 K 左右;(b)色温在 5200 K 左右  
Fig. 11 Relative spectral power distributions of LED module and type A LED at different CCT values. (a) CCT value close to 4000 K; (b) CCT value close to 5200 K

本方案使用的 A 类 LED,其色温为 6174 K;B 类 LED,其色温为 4326 K。得到了色温在 3400 K~5600 K,高显色指数( $R_a$  基本在 90 左右)的结果。按照此方法,若采用色温较高的 A 类 LED 和 B 类 LED,或者色温较低的 A 类 LED 和 B 类 LED,可以分别得到更高色温阶段或者更低色温阶段, $R_a$  和 LER 都较为理想的组合。这个类推已由程序计算的大量数据所证实是可行的,不再描述。

## 5 结 论

$R_a$  和 LER 都是由光源的光谱唯一决定的,要得到较高的  $R_a$ ,需要较为全面的光谱;而光谱越靠近 555 nm 波段,LER 越高(即一者的提高以另一者的降低为代价)。通过本方案设置的 LED 发光模块,调整 3 种不同 LED 各自的使用数目( $k_1$  为 6~20, $k_2$  为 1~6, $k_3$  为 1~8),可以很好地平衡 LED 灯的光谱,得到不同色温下显色指数和光效都较为理想的组合。

通过程序计算了色温为 6174 K 的 A 类 LED 和 4326 K 的 B 类 LED 组合时的情况,得到了色温在 3400 K~5600 K,高显色指数( $R_a$  基本在 90 左右)的结果。对比目前广泛应用的 A 类 LED( $R_a$  基本在 74~81),本方案设置的 LED 发光模块拥有明显较高的显色指数,光谱较为全面。另外,还可根据需求采用不同色温的 A 类 LED 和 B 类 LED 进行组合,得到其他色温区间优化组合的结果。

LED 灯中单纯使用蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED,显色指数不理想;在蓝光激发 YAG 荧光粉的白光 LED 中加单纯红光 LED,对光谱的贡献不够全面,效果不够理想,且红光 LED 加入较多会较大影响整个 LED 灯的光效。因此,用少许红光 LED 和少许蓝光激发 YAG 荧光粉中加入氮化物红色荧光粉的白光 LED 来补偿整个 LED 发光模块中所缺少的红光成分光谱,既达到了理想的效果,又控制了成本。同其他提高显色指数的方法相比,本方案设置的 LED 发光模块由独立的 LED 构成,加工方便,实施容易,成本较低,非常适合用于室内照明等对灯具显色指数要求较高的场合。该研究结果为 LED 灯在显色性方面的发展提供了一个方向。

## 参 考 文 献

1 Bai Shengmao, Wang Jing, Miao Hongli *et al.*. Luminescence properties of the  $Y_{3-x-y}Pr_xGd_yAl_5O_{12}:Ce^{3+}$  phosphors for white

- light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1402~1405
- 白生茂,王晶,苗洪利等. 用于白光 LED 的  $Y_{3-x-y}Pr_xGd_yAl_5O_{12}:Ce^{3+}$  荧光粉发光特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1402~1405
- 2 Ho Seong Jang, Duk Young Jeon. White light emission from blue and near ultraviolet light-emitting diodes precoated with a  $Sr_3SiO_5:Ce^{3+},Li^+$  phosphor[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(23): 3444~3446
- 3 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 余桂英,金骥,倪晓武等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 4 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 233~236
- 陈健,王庆康,李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体 LED 出光效率的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 233~236
- 5 Yoshi Ohno. Color rendering and luminous efficacy of white LED spectra[C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 88~98
- 6 He Jinhua, Liang Chao, Fu Yibing. Application of phosphor in high CRI white LED[J]. *China Light & Lighting*, 2009, (2): 11~13
- 何锦华,梁超,符义兵. 荧光粉在高显色白光 LED 中的应用技术研究[J]. *中国照明电器*, 2009, (2): 11~13
- 7 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1777~1782
- 吴海彬,王昌铃,何素梅. 涂敷红、绿荧光粉的白光 LED 显色性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1777~1782
- 8 Takeshi Fukui, Hiroaki Sakuta, Kazuyya Mishihiro *et al.*. Development of white light emitting diodes by multi-layered red, green, and blue phosphors excited by near-ultraviolet light emitting diodes[J]. *Light & Vis. Env.*, 2008, **32**(1): 43~45
- 9 Zheng Daishun, Qian Keyuan, Luo Yi. Fabrication and luminescence characteristics studies of the high-power white LEDs with low  $T_c$  and high  $R_a$ [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(12): 1422~1426
- 郑代顺,钱可元,罗毅. 低色温高显色大功率白光 LED 的制备及其发光特性研究[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(12): 1422~1426
- 10 Tan Li, Liu Yuling, Yu Feihong. Method for the computing of color-rendering index [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(4): 41~44
- 谭力,刘玉玲,余飞鸿. 光源显色指数的计算方法研究[J]. *光学仪器*, 2004, **26**(4): 41~44
- 11 Wu Jizong, Ye Guanrong. Measurement of Optical Radiation [M]. Beijing: China Machine Press, 1992. 358~364
- 吴继宗,叶关荣. 光辐射测量[M]. 北京:机械工业出版社, 1992. 358~364
- 12 Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources [S]. CIE 13.3:1995, 1995
- 13 International Commission on Illumination. Colour Rendering (TC 1-33 Closing Remarks) [S]. CIE 135/2:1999, 1999
- 14 Roya Mirhosseini, Martin F. Schubert, Sameer Chhajer *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): 10806~10813
- 15 Yoshi Ohno. Spectral design considerations for white LED color rendering[J]. *Opt. Engng.*, **44**(11):111302