

· 光电器件与材料 ·

高色温的荧光粉型白光LED的高S/P研究

卢红丽, 郭自泉, 党思佳, 高玉琳, 吕毅军

(厦门大学 电子科学系福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要:对于白光照明而言,显色指数(CRI)和暗视觉下光通量与明视觉下光通量的比值(S/P)是衡量白光光源质量的两个重要参数。CRI反映的是待测光源下物体色彩还原能力;而S/P值越高的光源下人眼视物越清晰,对节能也具有一定作用。一般而言,这两个参数越高越好;然而在实际中,两者是一对矛盾体。当前的大部分白光光源的S/P值普遍低于2.5。白光发光二极管(LED)具有光谱可调特性,因此可以通过优化光谱,在满足一定的CRI下获得更高的S/P值。首先模拟光谱,然后通过计算机编程调节光谱峰值波长、相对光强度等光谱参数,最终获得高色温(6 500 K)下高S/P值光谱,对于节能照明光源设计具有重要参考价值。

关键词:LED;光谱优化;峰值波长;S/P;显色指数

中图分类号:O433.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2016)-01-0024-05

Research on High S/P of Phosphor-type White LED with High Color Temperature

LU Hong-li, GUO Zi-quan, DANG Si-jia, GAO Yu-lin, LU Yi-jun

(Department of Electronic Science, Fujian Engineering Research
Center for Solid-state Lighting, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: For white light illumination, color rendering index (CRI) and scotopic/photopic (S/P) ratio are two critical parameters to evaluate the quality of white light source. The CRI is introduced to describe the color fidelity of objects under tested light sources. Under light sources with higher S/P values, human eyes can see more clearly, and it also has a certain effect on energy saving. In general, the higher is the values of the two parameters, the quality of the illumination effect is better. However, there is a trade-off between them. The S/P value of most of the current white light sources is generally less than 2.5. White light emitting diode (LED) has spectrum adjustment characteristic, so higher S/P value is obtained under the condition of meeting the certain CRI through optimizing spectrum. Firstly, LED spectrum is simulated, and then spectrum parameters such as spectrum peak wavelength and relative light intensity are adjusted through computer programming. Finally, high S/P value spectrum under the high color temperature of 6 500 K is obtained, which has an important reference value for energy-saving illumination lighting source design.

Key words: light emitting diode (LED); spectral optimization; peak wavelength; S/P; color rendering index

LED光源以其高节能、长寿命、体积小、环保安全的特点成为第四代新型节能光源,LED照明在室内外照明领域得到了广泛的应用^[1]。目前白光LED

(light-emitting diode)的相关技术已经取得了显著的进展。LED照明行业龙头企业科锐(Cree)公司在2013年报道了发光效率为303 lm/W的白光

收稿日期:2015-12-31

基金项目:中德国际科技合作项目(2015DFG62190)

作者简介:卢红丽(1989-),女,硕士,主要从事LED的光和热的研究;郭自泉(1985-),男,博士,工程师,主要研究方向为白光LED光谱优化和失效机制。

LED^[2]。目前的大功率白光LED主要分为两种类型:(1)由蓝光或紫外LED芯片涂覆荧光粉形成的白光LED;(2)由多个单基色LED芯片组合形成的白光LED。对于由多个单基色组合成的白光LED,虽然具有较高的灵活性和较大的发展潜力,然而这种白光LED成本较高^[3]。而涂覆荧光粉的白光LED的优势在于驱动电路设计简易、制作方便、耗电量低和成本低,所以目前大部分白光LED均采用涂覆荧光粉的白光LED。并且涂覆荧光粉的白光LED由于荧光粉发射光谱较宽,因而所构成的白光LED光谱的显色指数(color rendering index, CRI)可高于70、相关色温高于5 000 K。

人眼上有两种感光细胞分别是椎体细胞和杆体细胞,而且椎体细胞相对杆体细胞具有更高的感光灵敏度,所以当亮度在3 cd/m²以上的视觉条件下,椎体细胞起到主导作用,这时候眼睛对光谱响应函数成为明视觉视见函数;当亮度在10⁻³ cd/m²以下的暗视觉条件下,杆体细胞起到主导作用,这时候眼睛对光谱响应函数成为暗视觉视见函数;在10⁻³ cd/m²和3 cd/m²之间的范围内的视觉条件下,椎体细胞和杆体细胞是同时起到作用的。基于上面的视觉响应,同一个光源发出来的光谱在明视觉和暗视觉的环境下是不一样的,可以引入一个比值来描述这种区别,这个比值是暗视觉光通量与明视觉光通量的比(scotopic/photopic ratio, S/P)。S/P值的大小与人眼的瞳孔大小有一定关系^[4]即:在一个高S/P的光源下,人眼的瞳孔将变小,减少异常光线的进入,改善了视觉质量;反之低S/P的光源下,人眼的瞳孔将变大,一些异常光线的进入影响了视觉质量。所以获得一定视觉环境下高S/P值白光光源具有及其重要的意义。此外,高S/P的光源对于节能也有一定作用^[5]。基于这一重要意义,许多科研人员开展了制备高S/P光谱的光源的相关研究^[6-8]。2010年,Lita等利用CdSe-silica量子点荧光粉制备了高S/P的两基色白光LED^[9]。在相关色温(correlated color temperature, CCT)5 368 K下,荧光粉光谱的S/P值达到2.56,同时显色指数为86.6。2011年,Nizamoglu等采用CdSe/ZnS(核/壳)量子点荧光粉制备出高S/P的白光LED^[10]。2013年,Guo等研究获得了不同相关色温下的基于量子点荧光粉三基色和四基色的高S/P白光LED^[11-12]。

针对InGaN蓝光激发YAG荧光粉补充Al-

GaN红光LED,研究在6 500 K的相关色温下,显色指数达到70以上的最大S/P值。为了简便,仅通过调节三基色的峰值波长和相对光谱强度等光谱参数来得到高S/P光谱。

1 LED光谱的实验测量和理论分析模型

1.1 实验光谱测量

在实验中,将蓝光LED激发YAG荧光粉补充红光LED的白光LED作为实验研究对象。其中蓝光LED波长在450 nm左右,红光LED峰值波长在630 nm附近。实验装置中,采用Keithley 2611作为恒定电流源,给白光LED样品提供电流源;采用Keithley 2510作为控温源,热沉温度控制在25 ℃;采用德国IS(instrument systems)的光谱测试系统来测试光谱,设置IS的光谱积分时间为200 ms/nm,光谱间隔为1 nm。测试过程中为确保得到可靠的数据,须等样品工作半个小时后进行测量,最后对光谱仪收集的光谱进行。图1是试验中涉及的测试系统图。

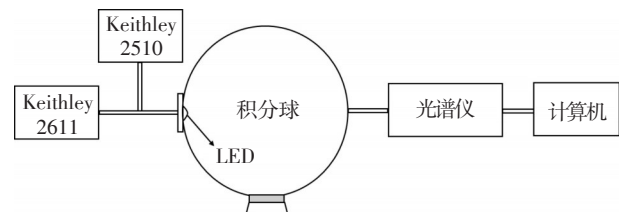


图1 测试系统示意图

1.2 LED光谱模型

在工作的理论分析中,首先来建立一个数学模型来对单色光的光谱 $S(\lambda)$ 进行拟合^[10]。即为

$$S(\lambda) = E(\lambda, \lambda_p, w_h) = A \left[\frac{1}{3} G(\lambda, \lambda_p, w_h) + \frac{2}{3} G^5(\lambda, \lambda_p, w_h) \right] \quad (1)$$

$$G(\lambda) = e^{-\frac{\lambda - \lambda_p}{w_h}} \quad (2)$$

其中, $S(\lambda)$ 为光源的光谱功率分布; λ 为波长。 A 、 w_h 和 λ_p 分别对应光谱的相对峰值强度、半高宽(FWHM)和峰值波长。对于研究对象的InGaN蓝光LED激发黄光YAG荧光粉补充红光LED,总光谱的表达式为

$$S_{\text{Total}}(\lambda) = S_B(\lambda) + S_Y(\lambda) + S_R(\lambda) \quad (3)$$

其中, $S_r(\lambda)$ 因为发黄绿光的 YAG 荧光粉发射光谱较宽, 而且光谱呈现出明显的不对称性, 故可通过两个双高斯方程拟合而成的^[11], 因此白光的 S/P 可表示为

$$S/P = \frac{1700 \times \int_{380}^{780} S_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{683 \times \int_{380}^{780} S_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

在式(5)中, $V'(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ 分别为暗视觉和明视觉下的视见函数。

白光 LED 的光视效能 (LER) 为明视觉的光通量与白光功率的比值, 定义为

$$LER = \frac{683 \times \int_0^{\infty} S_r(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S_r(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

其单位为 lm/W。

1.3 优化过程

根据上面的理论, 利用基于双高斯模型编写的光谱优化软件来调节得到最大的 S/P 值, 下面阐述具体过程, 图 2 为优化流程图。

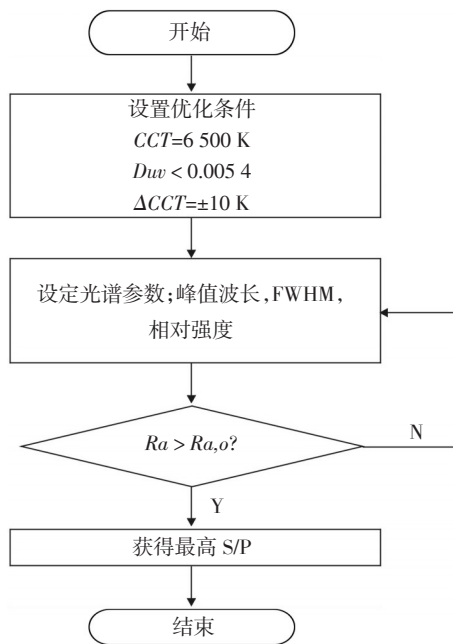


图2 优化流程图

首先设定光谱优化条件, 考虑研究高温下的最大 S/P, 所以设定相关色温 CCT=6500 K; 允许的 CCT 变化范围是 $\Delta\text{CCT} = \pm 10 \text{ K}$; 优化结果色坐标与目标色温的黑体在普朗克轨迹上色坐标在

CIE-1960UCS 色度系统的色度偏移满足 $D_{uv} < 0.0054$ 。接着, 设置光谱的优化参数如光谱峰值波长、光谱半高宽和光谱相对峰值强度。在文中的工作中, 为了简化计算, 三基色的 FWHM 依据实验所测试的数据分别设定在 30 nm, 130 nm 和 30 nm。仅通过改变光谱的峰值波长和相对强度来获取满足上述条件。当 $R_a > R_{a,o}$ ($R_{a,o}$ 阈值) 的最大 S/P 值。在优化过程中, 该 R_a 阈值分别设定为 $R_{a,o} = 70, 80$ 和 90 三档。对于峰值波长, 根据实验分别设定蓝光、绿光和红光初始值为 450 nm, 550 nm 和 630 nm。对于相对光强度, 在优化过程中分别从 1 变化到 5。首先, 蓝光以 5 nm 的步长在 430~490 nm 变动, 找出在上述光色参数条件下最大 S/P 值对应的蓝光峰值区间, 接着在这个区间中将步长调整为以间隔 1 nm 变化, 根据优化结果中最大的 S/P 值对应的蓝光波长就是要寻找的最佳蓝光波长。以同样的办法可以得到最大 S/P 对应的绿光(500~590 nm)和红光波段(600~650 nm)的最佳峰值波长。

2 结果和分析

2.1 实验结果和分析

首先, 基于 IS 光谱测试系统测试三基色白光光谱, 通过调整蓝光 LED 和红光 LED 输入的驱动电流使得 CCT 落在 6500 K 左右, 得到的光谱图如图 3 所示。

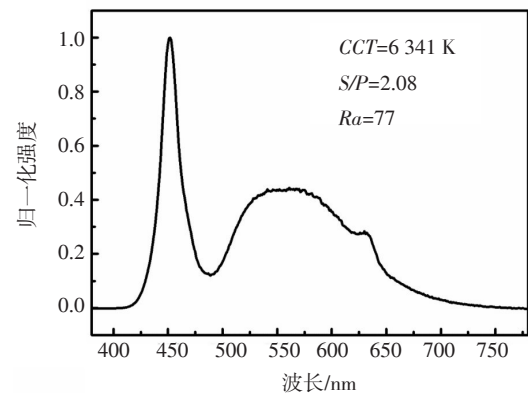


图3 实验测试的三基色光谱和光色参数

可以看出, 对于所测试的三基色白光光谱, 其 S/P 值为 2.08, 同时显色指数 R_a 值为 77。可以发现, 未优化的白光 LED 光谱的 S/P 低于 2.5。而通过改变光谱参数如峰值波长, 半高宽和相对强度等

会改变光谱,进而改变光谱的S/P值。下一步可以通过改变上述光谱参数,在指定的CRI阈值下,去得到更高S/P值。

2.2 优化结果和分析

对优化过程得到的300组Ra, Ra>70的光谱数据进行分析,发现Ra和S/P值是一对矛盾体,如图4所示。即Ra值较大的时候S/P值较小;反之,Ra值较小的时候S/P值较大,即要得到更高的光谱S/P值时,需要牺牲一定显色指数。对显色指数的要求不是很高的场合可以适当牺牲一定显色性来获得更高S/P值,通常情况下Ra值只要大于70就可以足以满足大部分照明场合对显色指数的一般要求。

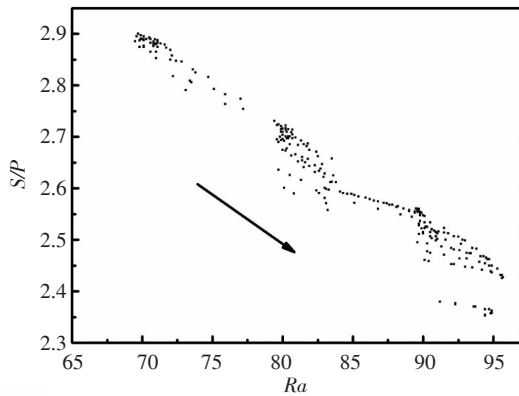


图4 Ra和S/P值的折中关系

通过这300组光谱数据,挑选出符合条件Ra=70,80,90下的最大S/P值。表1中是符合条件的三组较有代表性的光谱参数。其中LER是光视效能;x,y是色坐标;Duv是1960UCS色空间距离;W1,W2,W3是蓝光、绿光和红光波段的峰值波长;A1,A2,A3是蓝光、绿光和红光波段的相对光功率。发现在Ra=70时可获得最大的光谱S/P值2.9,相对实验的S/P值2.08提升了41.5%。

表1 三组具体光谱参数

Ra	S/P	LER	Qa	R9	x	y
69.7	2.90	281.2	70.4	32.0	0.312 7	0.328 5
79.7	2.72	286.3	75.0	28.9	0.312 5	0.331 4
89.5	2.56	292.8	79.6	47.4	0.312 4	0.332 4
Duv	W1	W2	W3	A1	A2	A3
0.002 9	473	536	623	4.1	1.2	2.4
0.004 5	469	537	628	4.4	1.6	2.9
0.005 1	464	539	631	4.7	2.0	3.2

从表1中看出,不同显色指数的条件下,S/P随Ra阈值增加变小;而优化的光谱对应的蓝光波长随Ra阈值增加而蓝移,绿光和红光则红移,其中蓝光的峰值波长变化对改善S/P值更明显。因此,在满足不同的Ra阈值下,优化的光谱参数需要做出一定的调整,才能获得较高的S/P值。这三种情况下的高S/P光谱图如图5所示。

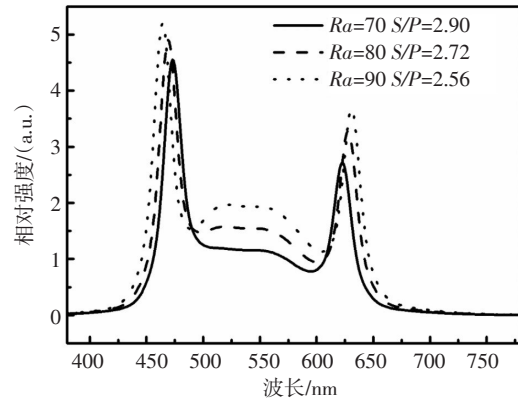


图5 不同Ra下的高S/P光谱

3 结论

从实验和理论的角度,针对蓝光LED激发YAG,加入红光LED的三基色LED,研究了6500K色温下,Ra和S/P的折中优化。在三个显色指数的阈值下,分别得到对应的最佳S/P值光谱。本工作对于获得6500K色温下高S/P的白光LED的设计具有一定指导意义。

参考文献

- [1] 刘木清.LED对照明学科的深远影响[J]. 照明工程学报, 2014,25(7):1-7.
- [2] CHHAJED S, XI Y, LI Y L, et al. Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes [J]. J. Appl. Phys., 2005, 97(5).
- [3] BERMAN S M. Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity[J]. J. Illumin. Eng. Soc., 1992, 21 (1): 3-14.
- [5] 李璇,金尚忠,王乐,等.中间视觉条件下不同色温光源对道路照明的影响[J]. 光电子·激光, 2011, 22(7): 997-999.
- [6] 史园.三基色芯片白光LED光谱的光视效能研究[J]. 电

子质量,2012,12.

- [7] 黄马连,陈焕庭,周小方,等.基于相关色温和光通量优化白光LED光谱[J].光子学报,2015,44.
- [8] 谈茜,饶丰,张永林,等.LED光谱特性及其在中间视觉下的应用[J].照明工程学报,2012,23(4):61-64.
- [9] Lita A, Washington A L, Burgt van de L, et al. Stable efficient solid-state white-light-emitting phosphor with a high scotopic/photopic ratio fabricated from fused CdSe-silica

nanocomposites[J]. Adv. Mater., 2010, 22(36):3987-3991.

- [10] Nizamoglu S, Erdem T, Demir H V. High scotopic/photopic ratio white-light-emitting diodes integrated with semiconductor nanophosphors of colloidal quantum dots [J]. Opt. Lett, 2011, 36(10):1893-1895.
- [11] GUO Z Q, SHI T M, GAO Y L, et al. Optimization studies of two-phosphor-coated white light-emitting diodes[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2):8200112.

(上接第3页)

表1为延时精度验证数据表。

表1 延时精度验证数据表

序号	预设等效光程			
	1 000	3 000	5 000	7 000
	测量延时时间/ns			
1	6 665.77	19 998.72	33 333.44	46 667.37
2	6 665.80	19 999.82	33 334.37	46 668.35
3	6 666.56	19 998.62	33 335.62	46 669.95
4	6 667.81	19 998.92	33 334.35	46 667.67
5	6 665.22	20 001.23	33 333.66	46 669.56
6	6 667.34	19 999.12	33 334.68	46 668.73
模拟功率/W	9.6×10^{-5}	7.3×10^{-5}	3.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}
测准率/%	98	95	88	67

6 结论

介绍了一种激光测距仪测距性能的检测方法,使用高精延时处理技术的回波模拟系统,对功率数学模型进行分析,对激光测距仪最大测程的检测。实验结果表明,该方法最大测程的测准率高于90%,延时误差小于2 ns,相较于光纤延时法的延时精度有了很大的提高,但是系统的硬件结构需要进一步改善,以保证对大功率的激光模拟器进行

检测。

参考文献

- [1] 李松山.激光多脉冲测距技术研究[D].长春:长春理工大学,2005.
- [2] 张延华,樊桂花,何永华.多脉冲激光回波信号处理方法研究[J].装备指挥技术学院学报,2011,22(1):94-96.
- [3] 黄仁,王寿增,张鑫.多脉冲激光测距信号处理技术研究[J].数字技术与应用,2012,11(3):125-126.
- [4] 郑宝玉.自适应滤波器原理[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [5] 王欣,王德军.离散信号的滤波[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [6] 高建辉.MS自适应滤波器的设计理论研究[J].信息技术,2011(8):112-114.
- [7] 周盛雨,孙辉先,陈晓敏,等.基于模块化设计方法实现FPGA动态部分重构[J].微计算机信息,2008,24(2-2):164-165.
- [8] 陈慧敏,郭渭荣,刘鹏,等.提高脉冲激光引信定距精度的仿真研究[J].光电技术,2008,34(5):721-723.
- [9] 陈奔,郭颖,杨俊,等.脉冲式高精度激光测距技术研究[J].红外,2010,31(6):236-238.
- [10] 余向东,张在宣,王剑锋.一种小型高精度脉冲式半导体激光测距仪[J].激光与红外,2008,38(5):458-461.