

文章编号: 0253-2239(2008)09-1777-06

涂敷红、绿荧光粉的白光 LED 显色性研究

吴海彬¹ 王昌铃² 何素梅¹

(¹ 福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; ² 福建省苍乐电子企业有限公司, 福建 福州 350007)

摘要 通过蓝光发光二极管(LED)芯片激发红、绿两种荧光粉制作白光 LED, 首先保持两种荧光粉的配比不变, 依次从 2700~13000 K 改变相关色温, 发现在某一色温段时, 显色指数达到最高。然后依次改变两种荧光粉的配比, 重复试验, 发现不同的荧光粉配比, 达到最高显色指数所对应的色温段不同。试验结果表明, 通过合理匹配红、绿荧光粉和硅胶三者之间的比例, 可以实现在 2700~13000 K 之间的任一色温区, 显色指数均能达到 90 以上, 在 4000 K 以下的低色温区, 显色指数可达到 96。基于此, 通过选择和匹配 LED 蓝光芯片、荧光粉的激发、发射波长, 以及它们之间的比例关系, 可以实现在任意色温段使显色指数最大化的白光 LED 光谱设计。

关键词 发光学; 白光发光二极管; 显色性; 荧光粉; 光谱

中图分类号 TN312 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082809.1777

Research of Color Rendering of White LED Based on Red and Green Phosphors

Wu Haibin¹ Wang Changling² He Sumei¹

(¹ College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)
(² Fujian Joinluck Electronic Enterprise Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350007 China)

Abstract White light emitting diodes (LED) are packaged based on blue LED dies surrounded by two different phosphors that emit red and green light respectively. First, the ratio of two phosphors maintains invariable, color rendering index achieves the maximal value in some color temperature, when it increases from 2700 K to 13000 K by degrees. Then, the ratio of two phosphors is changed gradually, by repeating above test, it is found that the color temperature corresponding to the maximal color rendering index is different at different phosphors ratio. The experimental results indicate that color rendering index can reach above 90 in any color temperature region from 2700 to 13000 K by matching the ratio of red, green phosphors and silica gel. Especially, color rendering index can achieve about 96 in the color temperature below 4000 K. Therefore, the maximal color rendering index in any color temperature can be obtained by the choice and match between blue LED dies, exciting and emitting wavelength, and the scale between them.

Key words luminescence; white light emitting diode; color rendering; phosphors; spectra

1 引言

随着超高亮度发光二极管(LED)芯片技术的发展, 半导体照明产业发展迅速^[1,2]。白光 LED 正在成为新一代照明光源, 半导体照明产品继续向大功率、高光效、低价格方向发展。据报道, 实验室水平已经达到 100Lm/W 以上的光效水平。产品可靠性也提高很快, 功率型 LED 的半光衰寿命可达到数万小时^[2], 明显优于白炽灯和荧光灯。随着成本的继

续下降和光效的进一步提高, 半导体照明产品必将大规模进入普通照明领域。由于 LED 具有节能、环保、低压驱动、体积小、方向性好等诸多其它光源无法比拟的优点, 在诸如摄影、医疗器械、移动照明等领域的应用也更能体现出其鲜明的特点。显色性是照明光源最基本最重要的性能指标, 不同类型的光源, 由于发光机理不同, 发射光谱在可见光范围内的分布不一样, 显色性也有很大不同。即使是同种类型的光

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-11-11

基金项目: 福建省自然科学基金(A0610010)资助课题。

作者简介: 吴海彬(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电子器件及其制备技术等方面的研究。

E-mail: wuhb@fzu.edu.cn

源,不同光谱设计,其显色性也有很大差别。白光 LED 的形成机理有多种,目前最成熟的方法是在蓝光 LED 芯片上涂敷发黄光的荧光粉,由透射出的蓝光和黄光混合形成白光。基于该方法的白光 LED,由于光谱中缺少红成分,其显色指数的提高受到限制,一般不超过 85 左右^[3],低色温白光 LED 显色性较差,不能满足照明场合对显色性和色温的要求。

白光 LED 的显色性主要取决于蓝光芯片和荧光粉的选择与匹配技术,也是制作白光 LED 封装的核心技术。为了提高白光 LED 的显色指数,通常需要采用两种荧光粉,以此弥补白光 LED 光谱在可见光范围内某些波长的光的不足^[4, 5]。为了在不同色温区均能使显色指数最大化,需要针对特定色温调整荧光粉和 LED 芯片在白光 LED 光谱中的发光比例。本文采用红、绿两种荧光粉通过蓝光 LED 激发制成 1 W 白光 LED 进行试验,对试验结果进行深入分析和对比,从中发现白光 LED 显色指数与蓝光 LED 芯片、两种荧光粉配比以及相关色温之间的复杂关系,从而为白光 LED 实现高显色性光谱设计奠定理论和试验基础,为达到最高显色指数提供一种可行的试验方法。本文的试验数据均由 PMS-50 光谱分析系统测试。

2 实现高显色性技术方案

2.1 高显色指数的实现机理

显色指数取决于光源的色坐标,色坐标取决于光源的光谱组成。计算显色指数是通过比对待测光源和参考光源照射标准色板产生的色差实现的,设两光源照射某一标准色板 i 产生的色差为 ΔE_i ,则光源一般显色指数(总计 8 个标准色板)可表达为

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (100 - 46 \times \Delta E_i),$$

式中 ΔE_i 为待测光源与参考光源照射标准色板 i 产生的色差。

为了满足某些特殊条件的使用,CIE 还规定了其它 6 个标准色板的色样。每一个标准色板代表一种特定颜色,8 个不同标准色板基本涵盖了可见光谱的各不同颜色区域。提高显色指数的直接途径就是通过调节待测光源发射光谱中不同波长光的比例,当照射各标准色板时尽最大程度减小与参考光源的色差,进而达到提高显色指数的目的。

2.2 蓝光 LED 芯片 + 发黄光荧光粉的显色性

随着芯片技术的发展,蓝光 LED 的发射波长越来越向短波方向偏移,目前蓝光 LED 的主波长多集

中在 455~465 nm 之间。发黄光荧光粉的发射波长多集中在 540~570 nm 之间。通过合理选择和匹配蓝光芯片和黄荧光粉,可以在一定程度上提高白光 LED 的显色指数。大量试验表明,基于蓝光 LED 芯片激发发黄光的荧光粉实现白光的技术方案,通常显色指数最高可达 85 左右。

如图 1 所示为用蓝光 LED 芯片激发黄荧光粉,产生色温为 10890 K 的白光 LED 的光谱图,其显色指数达到 85;色坐标 $x=0.2781, y=0.2798$;驱动电流 $I_F=350$ mA,光通量为 61 lm。这里,蓝光 LED 芯片主波长 $\lambda_D=460\sim 462.5$ nm,辐射功率 150~165 mW;荧光粉发射波长 $\lambda_{em}=(538\pm 4)$ nm、激发波长 $\lambda_{ex}=(464\pm 6)$ nm,1 W 白光 LED 封装结构如图 2 所示。

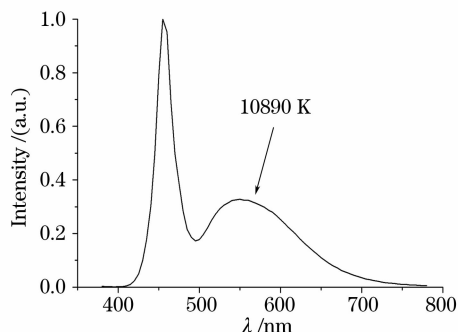


图 1 色温为 10890 K 的白光 LED 光谱图
Fig. 1 White LED spectra at color temperature of 10890 K

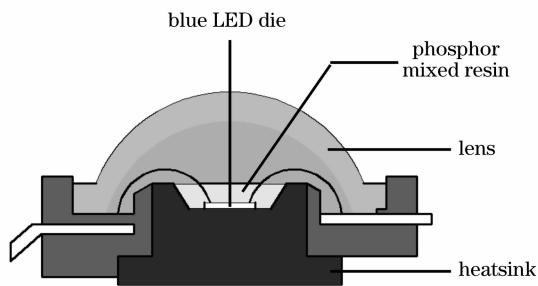


图 2 1 W 白光 LED 封装结构

Fig. 2 Package structure of 1 W white LED

在图 1 所示的白光 LED 光谱图中,有两个明显的峰值,分别为蓝峰和黄峰。若制作更低色温的白光 LED,需要降低蓝光而提升黄光的比例,但由于缺少红光成份,试验表明,当色温低到 4000 K 左右时,其显色指数明显变差,只有 55 左右,甚至更低。因此,基于蓝光 LED+黄色荧光粉制作白光 LED,其显色指数达到 80 以上的色温区很窄,显色指数更无法达到 90 及以上,限制了白光 LED 的应用。这主要是由于在低色温段,白光 LED 的光谱中缺少红

光成分,而在高色温区又缺少绿光成分所致。为了在 2700~13000 K 色温范围内实现显色指数大于 90,下面的试验采用蓝光 LED 芯片+绿荧光粉+红荧光粉的技术方案,讨论显色指数与色温和荧光粉配比之间的关系。

2.3 蓝光 LED 芯片+红、绿荧光粉实现高显色性

蓝光 LED 激发红、绿荧光粉,由透射出的蓝光和红、绿光混合形成白光,属于三基色白光 LED。通过调节白光 LED 光谱中蓝、绿、红光的比例既可

以实现不同的色温,也可以实现不同的显色性。为了实现不同色温区域显色指数的最大化,本文进行了下面的试验。主要试验材料选择如下:

1) 蓝光 LED 芯片:主波长 $\lambda_D = 457.5 \sim 460 \text{ nm}$, 辐射功率 $P_r = 250 \sim 280 \text{ mW}$, 正向压降 $V_F = 3.2 \sim 3.6 \text{ V}$, 正向电流 $I_F = 350 \text{ mA}$;

2) 这里采用的两种荧光粉,分别称为 P1、P2,其具体指标见表 1。从表 1 可知,P1 的发射波长在绿光区域,而 P2 的发射波长在红光区域。

表 1 两种荧光粉主要性能指标

Table 1 Main specifications of two phosphors

Phosphor name	Excitating wavelength /nm	Emitting wavelength /nm	Particle diameter / μm	Type
P1	445~450	516~525	5	YAG:Ce ³⁺
P2	420~550	651	5	CaS ₂ :Eu ²⁺

3) 配粉胶选用硅胶,折射率 $n = 1.42$,固化温度 80 °C/h。

为了研究和试验白光 LED 显色性与相关色温以及不同荧光粉配比之间的变化关系,试验采用如下步骤:

1) 采用一定比例的荧光粉 P1 和 P2 混合,再与适量的硅胶充分混合均匀,制作白光 LED。

2) 保持两种荧光粉之间的比例不变,依次改变与硅胶之间的配比,制作不同色温白光 LED。

3) 微调荧光粉 P1 和 P2 之间比例的大小,再重复上述试验。

4) 对所制作的所有白光 LED 进行光谱测试。

显色性主要取决于荧光粉 P1、P2 激发、发射光

谱、蓝光 LED 芯片的发射光谱,以及他们之间的光谱匹配与比例关系。试验中,前两步主要研究显色性与两种荧光粉同一配比下不同色温之间的关系,而第 3 步是研究显色性与两种荧光粉不同配比之间的关系。相关色温主要取决于蓝光与荧光粉发出的光的比例。

3 试验结果分析与讨论

3.1 两种荧光粉比例不变

保持荧光粉 P1 和 P2 之间的比例不变,而只通过改变其混合物与硅胶之间的配比,调节相关色温,分别制作了涵盖 2700~13000 K 色温段的白光 LED 样品,部分样品数据如表 2。

表 2 两种荧光粉配比不变情况下不同色温白光 LED 的性能指标

Table 2 Specifications of different T_c white LED invariable with proportion of two phosphors

Number	T_c /K	R_a	Luminous efficacy /(Lm/W)	$m_{\text{Resin}}:m_{\text{P1}}:m_{\text{P2}}$ (mass ratio)
1	5524	88.9	34.6	0.3400:0.0850:0.0160
2	6118	91.5	33.8	0.4000:0.0850:0.0160
3	7258	91.9	34.6	0.4000:0.0850:0.0160
4	9538	90.4	33.7	0.4000:0.0850:0.0160
5	12260	88.8	32.0	0.4600:0.0850:0.0160

值得注意的是,在实际制作白光 LED 样品时,实现不同色温可以有两种方法,一是通过改变荧光粉与硅胶的配比、保持涂敷在蓝光 LED 芯片周围的粉胶量不变实现不同色温(如始终保持粉胶量把反射杯填满),硅胶的比例越高,色温越高;二是保持荧光粉与硅胶的比例不变,而改变涂敷在蓝光 LED 芯片周围的粉胶量实现不同色温(实际也相当于改变荧光粉与硅胶的比例,因为涂敷荧光粉后的剩余空间也要用硅胶填充,只是操作方法不同而已),粉胶

量越少,色温越高。实际操作中,通常两者结合使用,当色温变化很大时,通常要调节荧光粉与硅胶的比例,当色温变化不大时,可以适当调节涂敷荧光粉粉胶的量达到预期目标。从表 2 硅胶与荧光粉配比数据可以看出,样品编号为 2、3、4 的白光 LED 就是采用同样的荧光粉与硅胶的配比,而改变涂敷量达到特定的色温;而样品编号为 1、5 的白光 LED 与 2、3、4 白光 LED 就采用不同的粉胶比例。

5 个白光 LED 样品的光谱图分别如图 3 所示。

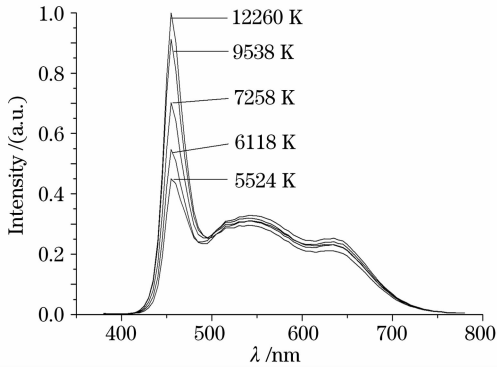


图 3 两种荧光粉配比不变时不同色温的光谱图

Fig. 3 Spectra of different T_c with invariable proportion of two phosphors

从图 3 可以看出,随着相关色温的升高,蓝光相对红、绿光的比例逐步增加,当色温达到 7000K 左右时,显色指数达到最大值,色温再升高,显色指数反而下降。由于两种荧光粉的比例不变,各种不同色温白光 LED 光谱图中红绿光部分的形状、比例也基本不变,几乎重合在一起。因此,通过逐步改变白光 LED 的色温,观察显色指数的变化规律,就可以找到显色指数达到最大时的色温区。如图 4 所示为表 2 白光 LED 显色指数随色温变化关系。

3.2 改变两种荧光粉的配比

在前面试验的基础上,再细微调节两种荧光粉

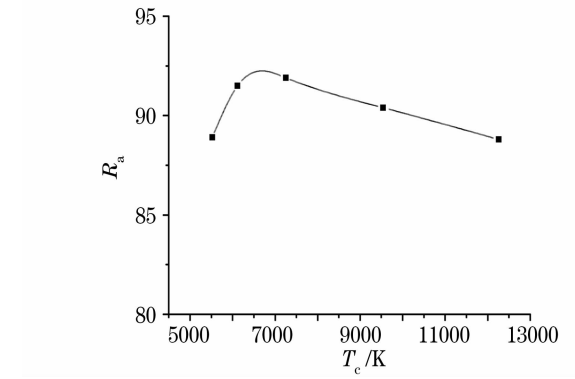
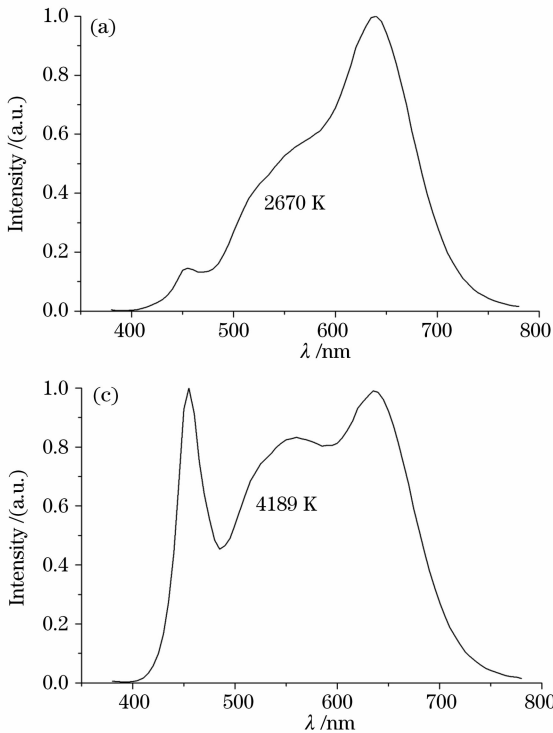


图 4 两种荧光粉配比不变时显色性与色温的关系

Fig. 4 Color rendering R_a versus color temperature T_c with invariable proportion of two phosphors

P1、P2 的配比,在每一个配比下,通过改变与胶的比例,制作不同色温的系列白光 LED,并找出显色指数达到最大值时所对应的相关色温,并为该白光 LED 进行编号,得到不同荧光粉配比下白光 LED 显色指数与相关色温之间的对应关系,部分数据见表 3。制作的所有白光 LED 样品均采用同样的封装结构,每颗白光 LED 的粉胶涂敷量相同。

上述编号为 1、2、3、5 的白光 LED 与 CIE 规定的其中几个照明色温区(2700 K、3000 K、4000 K、6400 K)较接近,光谱图如图 5 所示。

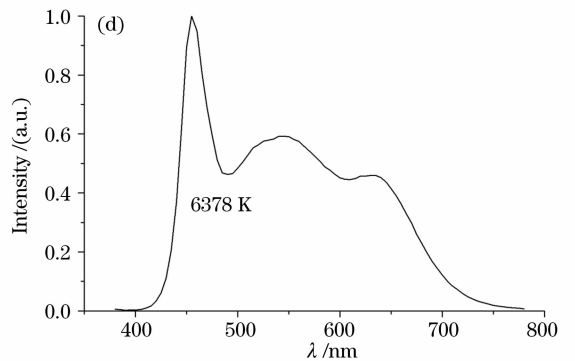
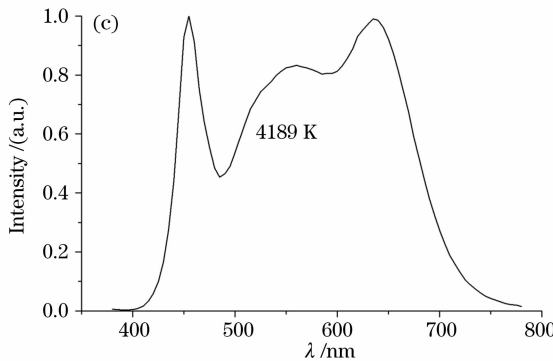
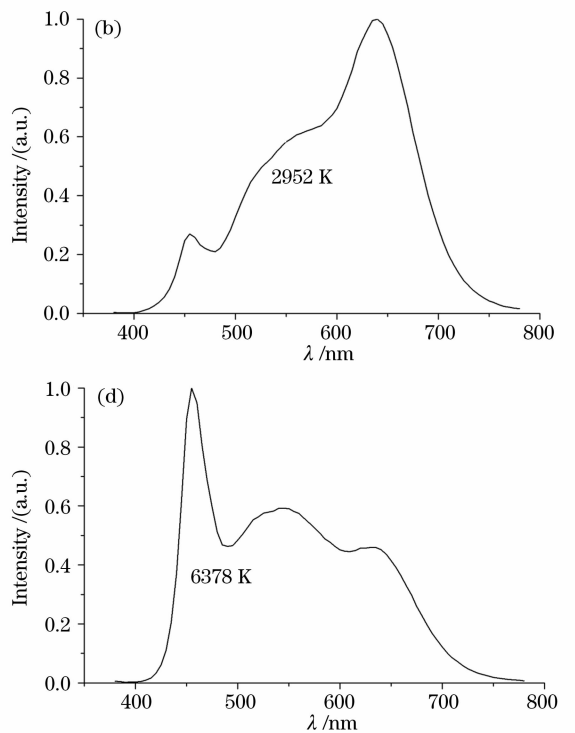


图 5 四种不同色温的高显色性白光 LED 光谱图

Fig. 5 Spectra with maximal R_a of four different T_c white LED

表 3 不同色温段显色指数所能达到的最高值

Table 3 Maximal Ra value for different T_c

Number	Phosphor ratio ($m_{P1} : m_{P2}$)	T_c / K	Maximal Ra	Luminous efficacy / (Lm/W)
1	0.130:0.045	2670	96.2	13.5
2	0.110:0.040	2952	97.0	17.1
3	0.110:0.038	4189	97.4	23.0
4	0.085:0.016	5040	92.5	26.2
5	0.085:0.015	6378	92.7	27.3
6	0.070:0.011	10460	91.8	30.7
7	0.070:0.010	13650	91.0	28.6

由表 3 数据可知,对于每一种不同的荧光粉配比,通过改变色温,都能够找到显色指数最大值所在的区域。而且在 2700~13000 K 色温范围内,最高显色指数均能达到 90 以上,两种荧光粉的配比不同,所对应的最大显色指数值所在的色温区不一样。在 4000 K 以下的低色温区,显色指数甚至达到了 96 以上。这样的显色性完全可以满足一些对显色性有特殊要求的场合。

如图 5 所示是色温分别为 2670 K、2952 K、4189 K 和 6378 K 白光 LED 的光谱图,可以看出,在不同色温区,不仅荧光粉发出的光与蓝光之间的比例有明显不同,而且由两种荧光粉产生的红光和绿光的比例也是不一样的。从表 3 数据还可以看到另外一个现象,随着色温的升高,白光 LED 的光效随之提高,在 2670 K 时,光效只有 13.5 Lm/W,当色温达到 10460 K 时,光效达到 30.7 Lm/W。因为低色温区红光成分相对比例高,而红光成分的 $V(\lambda)$ 值却很低,这就导致其光通量很低。当色温升高时,红光成分的比例逐步降低,光效也随之提高。另外,由于在 555 nm 时相对光谱光视效率 $V(\lambda)$ 最高,因此,提高光效最根本的措施就是使白光 LED 的发射光谱尽量向 555 nm 靠拢。由此可知,追求最大显色指数和最大光效在白光 LED 的光谱设计上存在矛盾。实际应用中,需要根据具体要求设计白光 LED 的配光光谱图,对于显色指数要求不高或没有要求的场合,没必要把显色指数设计得很高,因为这必定会在一定程度上降低光效。

4 结 论

通过上述分析,可知:

1) 上述试验及其数据是针对在所列材料基础上进行的试验,试验数据的具体值只对所列材料有意义,若材料改变(如选用不同厂家不同型号的荧光粉),其相关数据也随之改变,但规律是不变的。

2) 基于在蓝光 LED 芯片上涂敷红、绿荧光粉

制作白光 LED,其显色指数在从 2700~13000 K 之间均能达到 90 以上,但光效相对较低,特别是在 4000 K 以下的低色温区。

3) 本文的目的在于解决 2700 到 13000K 全色温范围内,如何实现高显色性白光 LED,并给出了试验方法和步骤。通过该方法和步骤,就可以得到在任意色温段使显色指数达到最大值时的两种荧光粉及其与硅胶的配比。

4) 由色度学等相关理论可知,显色指数高是要求白光 LED 在可见光范围内具有更饱满的光谱,而光效高是要求白光 LED 发出的光尽可能聚集在 555 nm 左右,由于二者之间目标和要求的截然不同,导致二者之间存在一定矛盾,也就是说,显色指数高必然要牺牲一部分光效,追求高光效必然要损失显色指数。但由于显色指数是 8 个试验色色差的平均值,因此,同样的显色指数,光谱成分可以有很大不同,这也为兼顾这两个性能指标提供了发挥的空间。

参 考 文 献

- Daniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhat, Dave Collins *et al.*. Illumination with solid state lighting technology[J]. *J. IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(2): 310~320
- Nadarajah Narendran, Yimin Gu. Life of LED-based white light sources[J]. *IEEE J. Display Technology*, 2005, **1**(1): 167~171
- Pan Yuexiao, Wu Mingmei, Su qiang. Tailored photoluminescence of YAG:Ce phosphor through various methods[J]. *Physics and Chemistry of Solid*, 2004, **65**: 845~850
- R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, M. R. Krames. High-power phosphor-converted light-emitting diodes based on III-nitrides[J]. *IEEE J. on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, **8**(2): 339~345
- Hao Wu, Xinmin Zhang, Chongfeng Guo. Three-band white light from InGaN-based blue LED chip precoated with green/red phosphors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(6): 1160~1162
- Yuan Jianhui, Zhang Zhenhua, Wang Xiaojun *et al.*. Effects of crystallinity of raw material Y_2O_3 on luminescent character of $Y_2O_2S:Eu^{3+}$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1243~1248
袁剑辉,张振华,王晓君等. 原材料性 Y_2O_3 的结晶性对 $Y_2O_2S:$

- Eu³⁺ 发光特性的影响[J]. 光学学报, 2005, **25**(9): 1243~1248
- 7 Wang Xiaohua, Fan Xiwu, Shan Chongxin *et al.*. Growth and optical characteristics of ZnCdSe/ZnSe QWs on Si substrate with ZnO buffer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 668~670
- 8 Wu Haibin, Wang Changling. Experimental research on influence of packing materials of white LED on its luminous decay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1091~1094
- 吴海彬, 王昌铃. 白光 LED 封装材料对其光衰影响的实验研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1091~1094
- 9 Muthu S, Schuurmans F J P, Pashley M D. Red, green and blue LED based white light generation: issue and control[C]. 37th

- Industry Application Conference*, 2002. 327~333
- 10 N. Narendran, Y. Gu, J. P. Freyssonier *et al.*. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs[J]. *J. Crystal Growth*, 2004, **268**(3~4): 449~456
- 11 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 143~145
- 邝海, 刘军林, 程海英等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(1): 143~145

“Code-V”杯光学设计大赛暨论坛

由中科院上海光机所主办的光学设计高级讲习班旨在提升我国光学设计人员的设计思想和理念, 培育光学大师, 目前安排的课程有光学系统设计、光机系统设计、光学薄膜、光学加工等。该高级讲习班自 2004 年由王之江院士提议举办以来, 已连续成功举办四届。第五届光学设计高级讲习班将在 2008 年 10 月举办, 同期将举办首届全国光学设计大赛和首届光学设计论坛, 《激光与光电子学进展》(核心期刊) 也将在论坛期间出版“光学设计”专刊。欢迎广大从事光学设计的人员踊跃参加。

主办单位:

中国科学院上海光学精密机械研究所

冠名单位:

Optical Research Associates

承 办:

光学期刊联合编辑部

组织委员会

共主席:

王之江 院士 上海光学精密机械研究所
薛鸣球 院士 苏州大学
朱健强 研究员 上海光学精密机械研究所

副主席:

徐文东 研究员 中国科学院上海光学精密机械研究所
Robert S. Hilbert 总裁 美国 Optical Research

Associates 公司

王涌天 教授 北京理工大学
范志刚 教授 哈尔滨工业大学
岑兆丰 教授 浙江大学
邢廷文 研究员 成都光电技术研究所

委员:

杜春雷 成都光电技术研究所
孟军和 天津航技术物理研究所

沈为民 苏州大学

王小鹏 西安应用光学研究所

翁志成 长春光学精密机械与物理研究所

张 新 长春光学精密机械与物理研究所

赵葆常 西安光学精密机械研究所

金 宁 昆明物理研究所

张国瑞 北京空间机电技术研究所

杨长城 华中光电技术研究所

李 林 北京理工大学

曾吉勇 凤凰光学(上海)有限公司

王文鉴 舜宇光学科技(集团)有限公司

日程安排

公布参赛试题: 2008 年 8 月 10 日

提交参赛作品: 2008 年 9 月 10 日~10 月 10 日

检验参赛作品: 2008 年 10 月 11 日~25 日

颁奖典礼暨光学设计论坛: 2008 年 10 月 29 日

奖项设置

奖 项	奖金金额
光学设计第一名	5000 元
光学设计第二名	3000 元
光学设计第三名	2000 元
光学设计第四~第十名	1000 元

所有参赛代表均可免费参加首届光学设计论坛及首届光学设计大赛颁奖典礼, 与顶级光学设计专家面对面交流。

详情请咨询(中国光学期刊网 www.opticsjournal.net)

中国科学院上海光学精密机械研究所 光学设计高级讲习班筹备组 段家喜 编辑

电话/传真: 021-69918426/021-69918098

E-mail: duanjiayi@siom.ac.cn