

面向半导体照明的光学

罗毅^{1,2} 冯泽心¹ 韩彦军¹ 李洪涛¹ 钱可元²

(¹ 清华大学电子工程系集成光电子学国家重点实验室/清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084)

² 清华大学深圳研究生院半导体照明实验室, 广东 深圳 518055

摘要 以发光二极管(LED)为核心的半导体照明光源成为世界公认的第三代照明光源。通常基于蓝光 LED 抽运黄色荧光粉产生白光的方案,因荧光粉的斯托克斯位移和宽光谱,其具有产业化价值的发光效率上升范围受到极大限制。另外,传统封装 LED 因其朗伯型发光分布和超高亮度会造成严重的眩光以及光分布难以满足照明应用要求从而导致光污染、光浪费,导致传统封装 LED 不能直接应用于通用照明领域。基于色度学原理,研究了半导体照明的极限流明效率,结果表明,基于红、绿、蓝三基色合成白光的方案,优化后在整个半导体照明白光区域显色指数 R_a 大于 80,其极限流明效率可达 430 lm/W,远远大于通常的蓝光 LED 与黄色荧光粉合成白光的方案。总结了在光学系统设计方面的系列成果:为使 LED 的配光满足应用要求,提出了基于分离变量的非成像光学系统设计理论以及为消除因光源的扩展性和法向矢量误差带来的照度分布偏移理想情况而引入的多种反馈迭代策略;面向道路照明,提出了按亮度设计自由曲面配光系统的方法,在保证照明参数满足标准的前提下,获得可实现最大的亮度/照度比的自由曲面光学系统;面向室内照明,利用非成像光学设计具有一体化微透镜结构的散光板,将类似于点光源的 LED 阵列转化为均匀柔和发光的面光源,大大降低了眩光,并引入模块化方案降低维修成本;面向特种照明,提出了由多个光学曲面构成的照度均匀的准直光学系统结构以及航标灯光源。

关键词 发光二极管;光学设计;非成像光学;极限流明效率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0900117

Optics in Solid State Lighting

Luo Yi^{1,2} Feng Zexin¹ Han Yanjun¹ Li Hongtao¹ Qian Keyuan²

¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics / Tsinghua National Laboratory on Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

² Semiconductor Lighting Laboratory, Graduate School at Shenzhen of Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract Solid state lighting sources based on white light emitting diodes (LEDs) are considered as the third generation lighting sources. Generally, white light is generated by combination of the blue LEDs and yellow phosphor with the Stokes shift and wide-band emission (PC LEDs), which limits the maximum luminous efficacy with industrialization value. In addition, traditional packaged LEDs cannot be directly used in lighting with high efficiency, perfect lighting effect and low glare because of their Lambertian radiation distribution and super high luminance. The luminous efficacy limit of the solid state lighting is investigated based on the colorimetry theories. Results show that the luminous efficacy limits of the three-color mixing LEDs can be as high as 430 lm/W with $R_a > 80$ at any white light chromaticities, and they are far higher than those of the PC LEDs. A series of achievements on LED optical system design finished by our group are summarized in this paper. To make the light distributions of the LED sources meet the lighting requirements, the non-imaging optics design theories based on the variable separation method and the feedback iteration method are proposed. For the application of the LEDs in the road lighting, a high

收稿日期: 2011-07-28; **收到修改稿日期**: 2011-08-05

基金项目: 国家 973 计划 (2011CB301902, 2011CB301903)、国家 863 计划 (2011AA03A112, 2011AA03A106, 2011AA03A105)、国家自然科学基金 (60723002, 50706022, 60977022, 51002085)、北京市科技计划 (Z111108055511005) 和北京市自然科学基金 (4091001) 资助课题。

作者简介: 罗毅 (1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事半导体光电子器件以及 LED 照明等方面的研究。

E-mail: luoyi@mail.tsinghua.edu.cn

energy efficient freeform optical system is obtained with the maximum luminance/illuminance ratio as well as satisfying the lighting requirements provided by Commission Internationale Del'Eclairage (CIE). For the application of the LEDs in the interior lighting, low glare, softly emitting and modularizing LED surface source is obtained by utilizing micro-ens diffusers designed with the non-imaging optics theories. Uniform collimating multi-surface optical systems are introduced for special lighting application.

Key words light emitting diode; optical design; non-imaging optics; luminous efficacy limit

OCIS codes 230.3670; 220.4298; 220.2945

1 引 言

近年来器件级白光发光二极管(LED)发光效率已经超过 100 lm/W 的水平,期望 2020 年达到 200 lm/W 的水平^[1,2]。白光 LED 器件在光效、环保和寿命等方面较传统照明有显著的优势,会在相当程度上替代传统照明光源。目前,我国的照明用电占全社会总用电量的 12%~15%,如果全部采用高光效白光 LED 作为照明光源,将实现全社会照明用电节约 50%,即相当于节约三座三峡电站的年发电量。因此,发展高效半导体照明光源对我国乃至全世界实现节能减排具有重要的意义。

表征照明光源性能的主要指标包括光通量、发光效率、眩光性、显色性、色温以及配光等。其中发光效率为光视效能(LER)和电光转换效率的乘积,当电光转换效率一定时,发光效率就完全取决于光视效能,对于明视觉而言,越接近 555 nm 的单色光,其光视效能越大。显色性一般用显色指数来表示,白光光谱越宽,越接近标准照明光源,其显色指数越大,最大值为 100^[3]。配光决定了目标平面的照明效果以及光能利用率情况,好的配光也会降低失能眩光。显然,光视效能与显色指数之间存在折中,而这是目前多数传统照明光源所无法兼顾的,如高压钠灯的光视效能可达 500 lm/W 以上,但是其显色指数却为负值;白炽灯显色指数接近 100,但其光视效能却不到 50 lm/W。对于半导体照明来讲,传统封装白光 LED 主要采用蓝光 LED 激发黄色荧光粉以实现白光,其显色指数可达 70 以上,但因荧光粉发光峰谱宽过宽,在人眼响应较低的波长处造成浪费,以及存在斯托克斯位移,所以蓝光 LED 激发黄色荧光粉混合产生白光的发光效率极限仅为 300 lm/W 左右,若考虑电光转换效率在实际情况下的极限约为 50%^[1],可预期具有工业价值的传统封装白光 LED 产品的光效只能达到 150 lm/W 左右,难以实现 200 lm/W 的路线图目标。在白光半导体照明光源满足色温范围和高显色指数的条件下,提高其极限流明效率成为一个研究热点。

传统封装单颗 LED 的光通量在 100 lm 左右,

而室内照明需要千流明量级的照明,城市道路照明需要万流明量级的照明;传统封装 LED 是 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ 半空间朗伯型发光,存在光污染与光浪费,并且在目标面上的照度由中心往四周急速下降,无法满足照明需求;传统封装 LED 的亮度约为荧光灯管的 5000 倍,会引起严重的眩光。从以上三个层面来讲,高光效 LED 器件并不能直接替代传统照明光源应用于通用照明领域。而另一方面,传统照明光源尺寸较大,根据 Entendue 守恒理论^[4],很难设计适中尺寸的光学系统将大尺寸光源发出的光高效地控制在有效区域以内,导致光污染与光浪费现象。而 LED 尺寸在毫米量级,可设计高效率的小尺寸配光系统,经配光后的半导体照明光源能减少传统照明光源造成的光污染和光能浪费,实现进一步节能减排。

本文基于红、绿、蓝三色 LED 的组合,在使其混合产生的任意色坐标点或色温的白光都具有高显色指数的条件下,研究了白光 LED 的发光效率极限;并详细介绍了本项目组在半导体照明光学系统设计方面的进展和面向道路照明、室内照明以及特种照明的应用情况。

2 半导体照明白光的最佳化

目前白光 LED 主要采用蓝色 LED 芯片激发黄色荧光粉模式,其因过宽的发光谱以及斯托克斯位移,产生较低的白光发光效率极限,另外,其显色指数也只有 70 左右,无法满足高质量照明需求。Mirhosseini 等^[5]提出了双蓝光 LED 激发黄色荧光粉的方式,虽然显色指数有较大提高,但光视效能提高并不明显,在 8000~3500 K 的色温变化范围内,其光视效能在 250~330 lm/W 之间,仍处于较低水平。另外,由于色温越低,所需的荧光粉量越多,从而导致更多的能量损耗,考虑到荧光粉吸收和斯托克斯位移后的低色温白光 LED 的流明效率极限会更低。

只有基于色度学原理优化后的多光谱白光 LED,才有可能同时具有高的光视效能和显色指数。由混色原理,多个单色光源色坐标组成的多边形区

域内任何一点,都可以通过这些光源以一定比例进行混合产生。对于确定的白光色坐标或色温,通过变化具有一定线宽的红、绿、蓝三色 LED 或红、黄、绿、蓝四色 LED 的峰值波长及其强度,使此色坐标或色温的白光获得最佳的光视效能和显色指数组合,这是目前主要采用的优化策略^[6,7]。这种策略所得到的只是在某一色坐标或色温下的最优化结果,而若变换多色 LED 的混合比例产生其他色坐标或色温的白光,其显色指数和光视效能不但可能不是最佳,甚至会产生较大偏离。

美国国家标准学会(ANSI)给出了 8 个标准色温块,以规范半导体照明光源在通用照明中的色度范围,其中每一个四边形代表某一色温的容忍度^[8]。应在此白光色度范围以内进行总体优化。对于三色 LED 混光,优化条件为

$$\max_{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3} \left[\frac{\sum_{x_w, y_w} \text{LER}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, x_w, y_w)}{N} \right], \quad (1)$$

$$R_a(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, x_w, y_w) \geq R_{aT}, \quad (2)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为红、绿、蓝三色 LED 的峰值波长, x_w, y_w 为在白光色度范围内均匀分布的 N 个色坐标点之一, R_{aT} 为所有色坐标点光谱的一般显色指数限制值。

在计算中,蓝光、绿光和红光 LED 的线宽分别为 20, 30 和 20 nm。理论计算结果表明,当蓝光峰值波长在 462 nm,绿光峰值波长在 543 nm,红光的峰值波长在 609 nm 时,在整个 ANSI 规定的白光区域内,不仅实现了三色混合产生任意色坐标点白光的显色指数大于 80,而且可获得 334~430 lm/W 的光视效能输出,如图 1 所示。

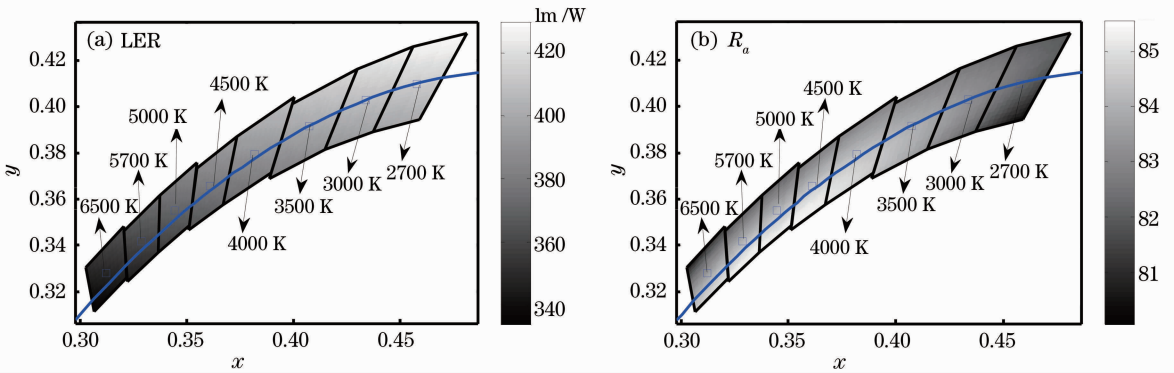


图 1 光视效能(a)和显色指数(b)随白光 CIE 1931(x, y)色坐标的变化趋势

Fig.1 LER and (a) (b) R_a change with the white light chromaticities based on the CIE 1931(x, y) color space

由图 1 可以看出,在 2700 K 的低色温块内,三色混合产生白光 LED 的最高发光效率极限为 430 lm/W,相比荧光粉转换 LED 提高近 130 lm/W,其已接近高压钠灯的 500 lm/W 的水平,而显色指数相较高压钠灯却有显著的提高,可以说目前还无其他光源具备这种能力。另外,通过改变此三色 LED 的输入功率所混合产生的任意色坐标点或色温的白光,其显色指数均大于 80,使色温可调的高质量白光照明光源变得更加可行。因此,三色混合产生白光的方案成为半导体照明光源的一个重要发展方向。

目前,绿光 LED 电光转换效率低、三基色 LED 光衰不一致以及驱动电路较为复杂是限制直接使用三色混光 LED 的主要障碍。一种过渡的解决方案是由蓝光 LED 抽运荧光粉产生窄线宽的绿光和红光,从而混合产生白光,该方案可以克服直接使用红、绿、蓝三色 LED 的不足,但其关键就在于获得高效率、高

可靠性的可产生窄线宽绿光、红光的荧光粉。

3 基于分离变量法的非成像光学设计理论

传统光源通常具有较大尺寸结构并且是全空间发光,造成其光学系统效率低下、对光束控制能力弱,大量光能入射到目标平面以外的区域,引起光能浪费和光污染。而 LED 尺寸较小,可设计光学系统对其发出的光进行精确调控从而获得近乎理想的照度或亮度分布,不仅提高系统光效,而且提高其光能利用率,实现进一步节能减排。实现这一功能的三维自由光学系统设计方法称为非成像光学系统设计方法,该方法将光源发出的能量尽可能多地分配至目标平面并形成预定的光分布^[9,10]。利用非成像光学构建三维自由曲面配光系统,实际上是求解两个基本方程,即能量守恒方程与矢量折射/反射方程

$$\iint_{\Omega} I(\mathbf{i}) d\Omega = \iint_S E(\mathbf{t}) ds, \quad (3)$$

$$[1 + n^2 - 2n(\mathbf{O} \cdot \mathbf{i})]^{1/2} \mathbf{N} = \mathbf{O} - n\mathbf{i}, \quad (4)$$

式中 $I(\mathbf{i})$ 为光源发光强度, Ω 为光源发光立体角, $E(\mathbf{t})$ 为目标平面照度分布, s 为目标平面面积, \mathbf{i} 为入射光线单位矢量, \mathbf{O} 为光线经自由曲面折射或反射后的单位矢量, n 为折射率, 当反射时 $n = 1$ 。传统方法归结为求解复杂的二阶 Monge-Ampere 偏微分方程^[8,9]。本项目团队提出了分离变量的设计方法^[11,12], 简介如下。

根据能量守恒, 由 LED 发出的光能量与照射在目标平面上的能量相等, 可获得 LED 发光球面坐标

(u, v) 与目标平面直角坐标 (x, y) 的一一对应关系^[11,12]

$$I(u, v) |J(u, v)| dudv = E(x, y) |J(x, y)| dx dy, \quad (5)$$

式中 $|J(u, v)|$ 和 $|J(x, y)|$ 代表 Jacobian 因子。若球面坐标均匀划分, 由分离变量可以得到目标平面直角坐标和 LED 发光球面坐标的纵向对应关系 $y = f(u)$ 以及横向对应关系 $x = g(v)$, 称之为光源至目标的划分策略, 如图 2(a) 所示; 反之, 也可以将目标区域均匀划分, 反向求解 LED 发光球面坐标的划分, 称之为目标至光源的划分策略^[13], 如图 2(b) 所示。

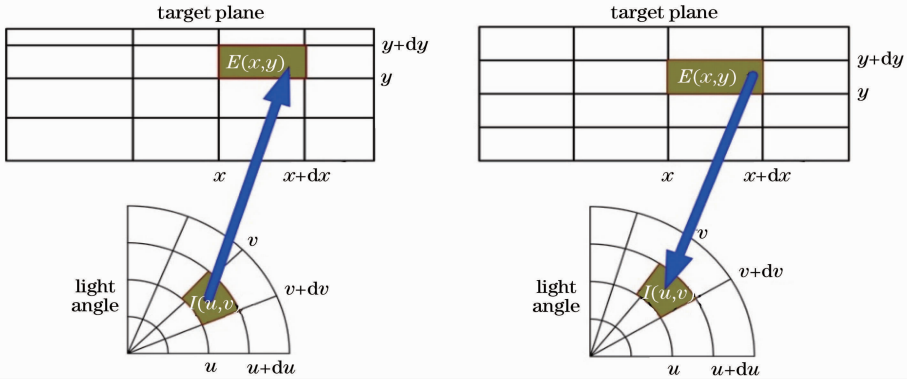


图 2 光源至目标(a)与目标至光源(b)的设计策略

Fig. 2 (a) Source to target and (b) target to source design strategies

获得以上坐标对应关系以后, 根据递推法和矢量反射/折射定律确定表面离散数据点坐标及其法向矢量, 并引入非连续性表面来消除表面法向矢量误差的影响。为进一步减小法线矢量误差, 提出了带状表面三维构型方法, 此时自由曲面光学系统更加不连续^[13]。

相比于传统光源, LED 芯片的尺寸足够小, 在相当多的应用领域中, 可以近似为点光源。但在实际应用中, 为了减小透镜材料对光能的吸收损耗, 同时也出于降低制造成本的考虑, 需要将透镜的尺寸尽可能减小, 从而导致光源的尺寸无法忽略, 会引起给定照度分布的偏移。为了消除自由曲面表面误差和光源的扩展性带来的影响, 提出了反馈迭代方法^[14]。假如将自由曲面光学系统设计与仿真看作一个系统, 那么当输入给定照度分布 $E_0(x, y)$ 时, 实际 LED 发出的光经光学系统后输出的照度分布 $E'(x, y)$ 与输入的照度分布并不相同, 因此需要寻找某一输入照度分布 $E(x, y)$ 使输出的照度分布接近给定照度分布 $E_0(x, y)$ 。通过目标至光源的设计策略, 引入反馈函数, 逐步补偿修正预设照度分布,

重新获得的配光系统将 LED 发出的光折射为接近给定的照度分布。在某一次反馈时, 反馈函数与上一次的输入照度分布以及仿真结果有关, 所以称之为反馈迭代方法, 其过程如图 3 所示。

以形成均匀照度分布的设计为例, 经反馈后, 给定区域内照度均匀度从 19% 提高到 81%, 如图 4 所示^[14]。

以上所述目标区域网格固定的反馈迭代设计方法能较直接地实现当前反馈修正因子与上一次仿真结果以及给定照度分布的接口, 从理论上而言, 这种方法能够实现目标区域不同照度区间的精确定界, 即实现不同照度区域的能量权重调整。然而, 这种方法存在构点精度低的问题, 会导致实际仿真结果出现偏差。采用光源能量网格固定的反馈迭代设计方法均匀划分光源角度, 在反馈迭代的过程中保持这种划分不变, 通过调节目标区域的网格划分, 调整目标区域各网格的面积大小, 实现负反馈修正。根据抽屉原理, 这种划分能使构点精度最大化。目标区域网格固定和光源能量网格固定两种反馈迭代设计方法有各自的优点, 因此, 可以把两种方法有机地

结合起来,前者实现能量划分宏观调控,后者实现各区域内照度分布微观调控,这就是组合式反馈迭代

设计方法的基本原理^[15]。

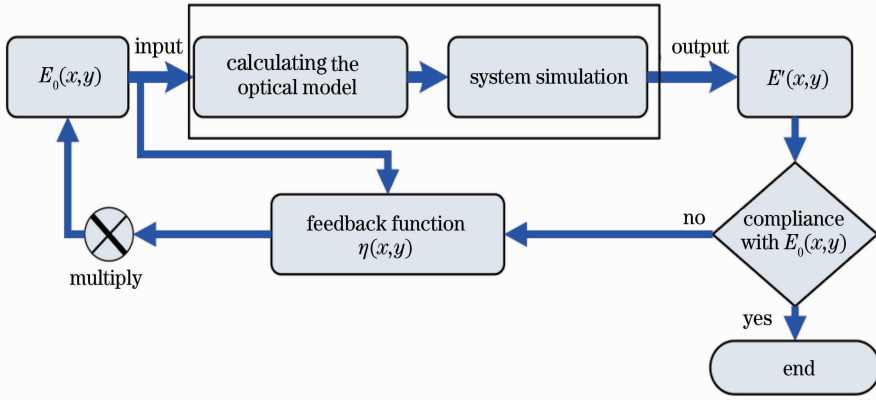


图3 反馈迭代方法流程图

Fig. 3 Flow diagram of the feedback iteration method

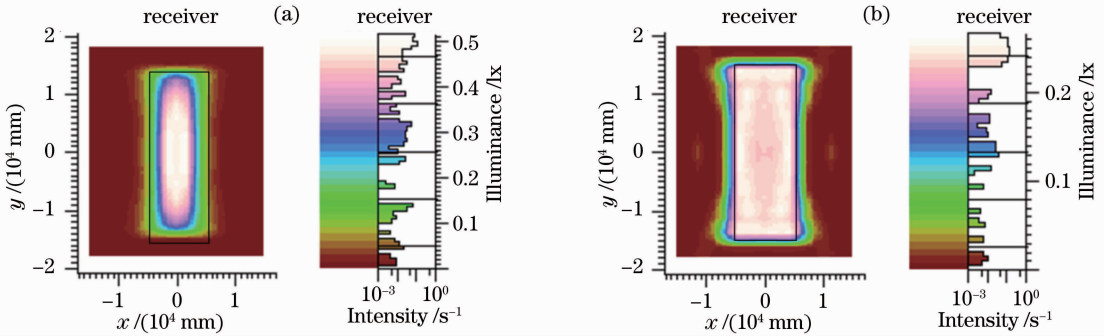


图4 反馈前(a)与反馈后(b)的照度分布

Fig. 4 Illuminance distribution (a) before and (b) after feedback

此处通过引入框架线和区域线构造自由曲面,两种反馈迭代方法可以有机地结合起来。所谓框架线,是对应宏观的简单照度分布区域划分的表面曲线,用于调整区域间的能量权重,如图5(a)所示。而区域线则分布于框架线之间,对应微观的各个简单照度区域内网格划分的表面曲线,用于调整各区域内的照度分布,如图5(b)所示(彩图请见网络电子版)。从图5中

可以看出,每次反馈过程中,必须先使用目标区域网格固定反馈迭代设计方法构造框架曲线,调整宏观能量权重划分,得到各个简单照度区域对应的光源角度范围(u, v)。然后在各框架曲线之间,根据抽屉原理均匀划分该区域对应的光源角以保持较高的构点精度,使用光源能量网格固定反馈迭代设计方法构造区域曲线,调整微观各区域内照度分布。

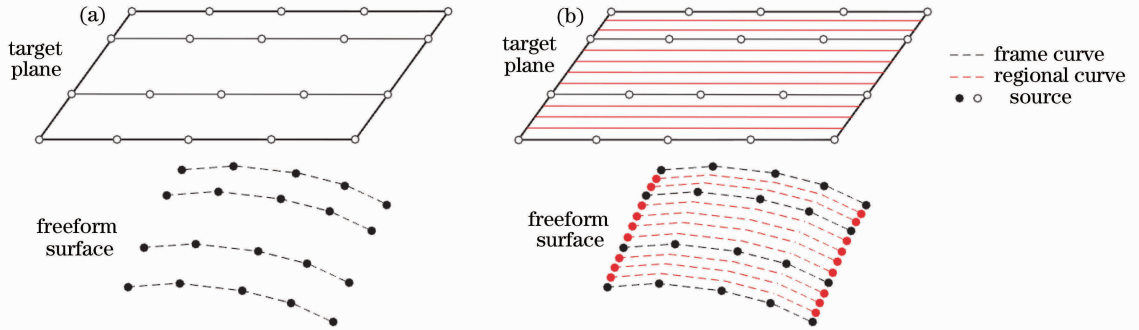


图5 自由表面曲线构造过程。(a)构造框架曲线;(b)构造区域曲线

Fig. 5 Combined feedback process of the freeform surface curves. (a) Frame curves established; (b) regional curves established

通过一个设计实例来验证该反馈迭代设计方法实现复杂照度分布的效果,设计实例参数为:在距离装备了自由表面光学系统的 LED 光源 7 m 的平面上,形成一个 30 m×30 m 的方形照度区域,如图 6(a)所示。方形照度区域内的复杂照度分布如图 6(b)所示。

示,该照度分布共分为 5 个简单照度区域,其中区域 1,3,5 皆为 30 m×8 m 的条形均匀照度分布,区域 2,4 为 30 m×3 m 的条形照度分布。各个宽照度区域与窄照度区域的能量比为 16:3,即区域 1,3,5 与区域 2,4 的总能量比为 8:1。

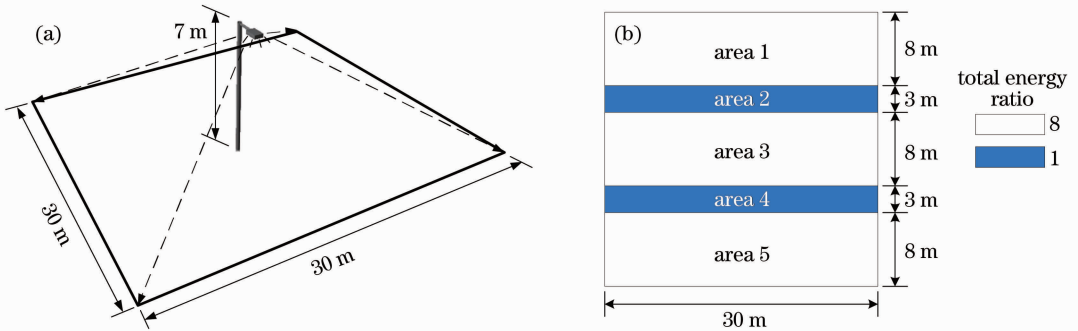


图 6 设计实例。(a)设计参数示意图;(b)预设复杂照度分布示意图

Fig. 6 Design example. (a) Design parameters; (b) prescribed illuminance distribution pattern

图 7 展示了使用上述两种反馈迭代方法设计的初始光学模型及最终光学模型仿真结果,其中图 7(a),(b)为目标区域网格固定反馈迭代方法的设计结果,图 7(c),(d)为组合式反馈迭代设计方法的设计结果。从初始结果与最终结果的对比可以看出,经过反馈迭代设计后的最终设计相比初始设计在仿真结果上有了较大改进,基本消除了初始结果中出现的局部亮斑,使区域照度均匀度有了较大提升,更加符

合预设目标。然而,由于目标区域网格固定反馈迭代方法设计的光学系统构点精度低,会出现能量外泄加剧的现象,区域照度均匀度也不能达到较高的水平,而组合式反馈迭代设计方法都能在反馈过程中保证较高的构点精度。照度区域内照度均匀度为 92.3%,而光利用率也达到了 97.7%的高水平(不考虑菲涅耳损耗)。可见对于复杂照度分布设计实例,组合式反馈迭代设计方法体现出很大的优势。

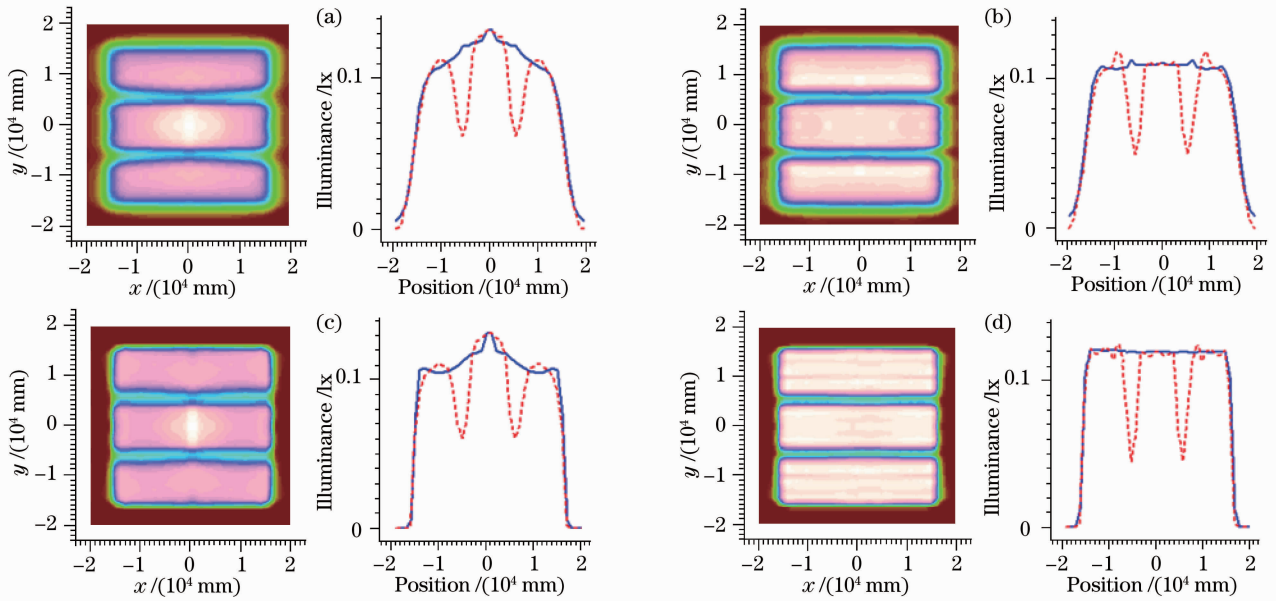


图 7 两种不同反馈迭代设计方法的仿真结果。(a)目标区域网格固定初始设计结果;(b)目标区域网格固定最终设计结果;(c)组合式反馈迭代初始设计结果;(d)组合式反馈迭代最终设计结果

Fig. 7 Simulation results of the two feedback iteration methods. (a) Initial result of feedback with fixed target grid; (b) final result of feedback with fixed target grid; (c) initial result of combined feedback design; (d) final result of combined feedback design

4 以提高亮度/照度比和亮度均匀性为目标的道路照明设计应用

为消除传统道路照明光源所引起的光污染和光浪费,针对 LED 光源,提出基于分离变量法和反馈迭代法设计自由曲面光学系统将 LED 发出的光折射使其恰好覆盖道路宽度和周边一定区域,从而实现理想的高光能利用率配光,如图 8 所示。

要确定光能在路面上的分布情况,一种思路是将光能量均匀分配到路面上,称为等照度配光,目前 LED 应用于道路照明普遍采用这种形式。照度仅

仅是单位面积接收到的光通量,它并不代表进入人眼的、被人眼所感知的路面反射光的情况。实际上,人眼感知的是路面的亮度,亮度是指路面单位面积单位立体角内反射的光通量,与入射光线的强度、路面的反射性能以及观察位置有关。图 9 为等照度配光产生的亮度分布图,其亮度分布极不均匀,产生“灯下黑”的现象。在整个路面上这种明暗相间的现象称之为“斑马纹效应”,会导致驾驶员眼睛的视觉灵敏度下降。

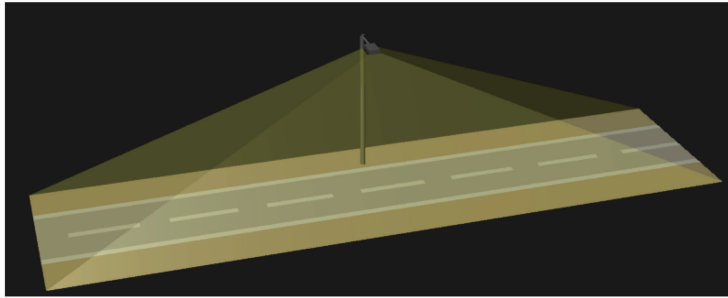


图 8 针对道路照明的高光能利用率配光覆盖区域

Fig. 8 Light distribution with high light energy utilization for LED road lighting

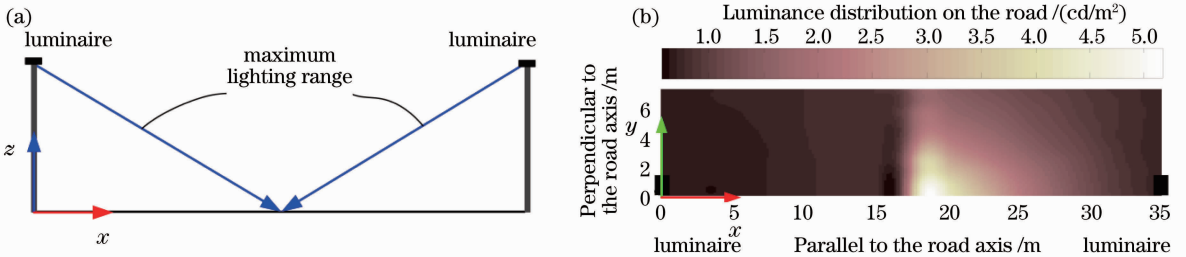


图 9 (a) 等照度分布示意图; (b) 等照度分布在路面上产生的亮度分布

Fig. 9 (a) Illustration for the uniform illuminance distribution; (b) luminance distribution produced by luminaires with uniform illuminance

等亮度配光的主要参数有亮度均匀度、纵向亮度均匀度、平均亮度以及眩光因子,其中亮度均匀度、平均亮度和眩光因子对显示障碍物能力有显著的影响^[16],而纵向亮度均匀度是“斑马纹效应”的主要评价指标,直接关乎人眼的视觉灵敏度。等亮度配光大大增加了道路照明设计的难度,比如:为了提高平均亮度及亮度均匀性需大角度配光,亮度计算需同时考虑几盏灯对亮度的影响;亮度均匀性与平均亮度,眩光与平均亮度等之间存在“trade-off”;传统“try and error”的配光方法效率低,且无法同时满足要求。由于道路照明的复杂性,优化理论应用到道路照明中,Pachamanov 等^[17]提出了具有 15 个未知系数的光强多项式,通过优化这 15 个系数来获得较好的照明效果。然而这种复杂的光强公式难以在

灯具设计中实现,因此,在优化过程中,这里仅考虑两盏路灯对计算区域亮度的影响。

提出了系统的按路面亮度设计 LED 自由曲面透镜的方法^[18],主要分为两个步骤:1) 确定安装条件(路面宽度、安装高度和路灯间距等)后,选择照度分布,利用路面反射系数计算照明参数(总亮度均匀度、纵向亮度均匀度和眩光因子等),在保证总亮度均匀度、纵向亮度均匀度、眩光因子满足照明标准的前提下,获得可产生最高平均亮度与平均照度比的优化照度分布;2) 基于分离变量法、按优化的照度分布设计 LED 自由曲面光学系统,因曲面误差以及光源的扩展性,仿真照度分布会偏移优化照度分布,基于反馈迭代法消除照度分布的偏移,得到具有优化照度分布的自由曲面光学系统。

步骤 1) 中提出了具有余弦基函数的照度分布^[17]

$$E_0(x, y) = E_x(x) \cdot E_y(y) = \left[\sum_{i=1}^J a_i \cos^{n_i} \left(\frac{\pi x}{2x_{\max}} \right) \right] \cdot 1 = \sum_{i=1}^J a_i \cos^{n_i} \left(\frac{\pi x}{2x_{\max}} \right), \quad (6)$$

式中 x 为沿路轴方向的坐标, x_{\max} 为其最大值, y 为沿路轴方向的坐标, a_i, n_i 分别为未知的系数和幂次。亮度分布表示为^[17]

$$L(x, y) = \sum_{k=1}^K \frac{r_k(x, y)}{10^4 \cdot \cos^3 \gamma_k(x, y)} \cdot E_k(x, y), \quad (7)$$

式中 r 为路面的反射系数, γ 为光线与灯杆的夹角, K 代表需考虑的路灯展数。当确定路面的照度分布与亮度分布后, 就可以计算平均照度 E_{av} 、平均亮度 L_{av} 、 Q 值 (L_{av}/E_{av})、亮度总均匀度 U_0 、亮度纵向均匀度 U_L 、照度均匀度 E_0 , 也可以方便地计算出眩光因

子 G_{TI} 。通过选取 a_i, n_i 值, 即不同的照度分布, 在使 U_0, U_L, G_{TI}, E_0 满足照明标准的前提下, 可获得最高 Q 值。采用余弦函数多项式的照度分布具有以下优点: 易于平衡所有照明参数、获得较好的容忍度; 自由曲面光学系统可根据分离变量法设计实现; 变量 a_i, n_i 少, 计算速度快。

优化照度分布以后, 根据分离变量法设计自由曲面透镜, 其配光曲线如图 10(a) 所示^[16]。可以看出, 其与优化结果存在较大差别, 最大光强角下降约 10° , 从而导致 Q 值的降低。经 5 次反馈以后得到的配光曲线如图 10(b) 所示^[18], 其与优化结果接近, 光能出射率达到 93%, 光能利用率为 84%。表 1 为最优化的照明参数、未经反馈前仿真得到的照明参数以及反馈后仿真得到的照明参数^[18]。

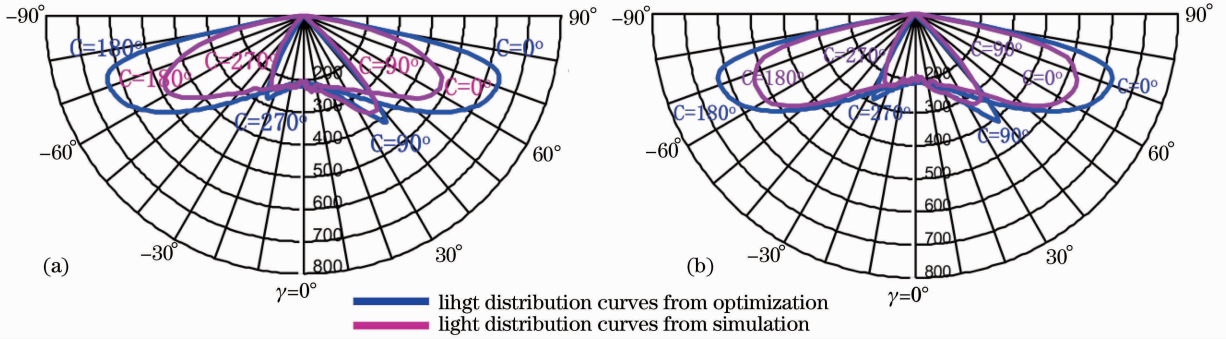


图 10 未反馈前的配光曲线(a)和反馈后的配光曲线(b)与优化配光曲线对比

Fig. 10 Light distribution curves (a) before and (b) after feedback

表 1 优化结果、未经反馈前的仿真结果以及反馈后的仿真结果

Table 1 Lighting parameters of the optimization, the simulation before feedback and the simulation after feedback

Observer position		$L_{av}/(\text{cd}/\text{m}^2)$	U_0	U_L	$G_{TI}/\%$	E_{av}/lx	E_0	$Q/10^{-2}$
(-60.000, 5.625, 1.500)	Optimization	1.50	0.55	0.78	6.99	16.96	0.78	8.85
	Before feedback	1.50	0.60	0.79	5.47	19.49	0.652	7.70
	After feedback	1.50	0.55	0.79	6.73	17.25	0.71	8.69

此种方法已经应用于实际新型高效 LED 道路照明光源中。与国内外公开的同类产品的性能对比表明, 新型高效 LED 道路照明光源在配光分布、能效、眩光控制等方面处于国际较高水平行列。实际道路测试表明, 在显色指数、照明均匀度和平均照度等均优于高压钠灯条件下, 比市售高压钠灯节电 50% 以上, 通过在户外通用照明领域的大规模应用展示了半导体照明光源在高品质照明和节能减排方面的优势, 为国家“十城万盏”计划提供了重要的技术基础, 使我国半导体照明光源制造技术在国际上占有了先机。

5 以降低眩光为目标的室内照明设计应用

室内照明除了对灯具的色温、显色指数等要求较高外, 还要求尽可能消除不舒适眩光。评价不舒适眩光的重要方式之一就是计算统一眩光指数 (UGR)^[19]。UGR 并不是评价某一套灯具的不舒适眩光程度的值, 它是一个通过计算与产生眩光有关的各种参数得到的表征整个照明空间的不舒适眩光程度的值, 对于照明各条件已知的情形, 可采用 UGR 评价眩光, 但对于灯具本身, UGR 可操作性差。提出用

光出射度来评价灯具眩光性,如 LED 光出射度在 100 lm/mm^2 , 荧光灯光出射度在 0.02 lm/mm^2 。半导体照明光源应用于室内照明领域,其光出射度应与荧光灯处于接近的水平。如何将 LED 点光源高效地转化为均匀柔和发光的面光源是目前 LED 应用于室内照明领域所面临的挑战。另外,若 LED 面光源将多数 LED 封闭在内部,加大了替换性难度,增加了维修成本。

本课题组的技术方案是利用非成像光学设计具有一体微透镜结构的散光板,将 LED 发出的光均匀

地散射成均匀亮度的面光源,并引入模块化方案,每一个模块均包含一片散光板、反光杯、LED 阵列、外壳以及接头。

从 LED 阵列发出的光杂乱地入射至微结构表面[如图 11(a)所示],不可能精确设计微结构曲面,但是鉴于多数光以小角度入射至微结构表面,可按准直光进行设计,如图 11(b)所示,利用第 3 节中的反馈迭代方法消除较大角度入射光的影响。将微结构裁剪为正六边形,实现无缝拼接[如图 11(c)所示],防止小角度光的泄漏影响散射效果。

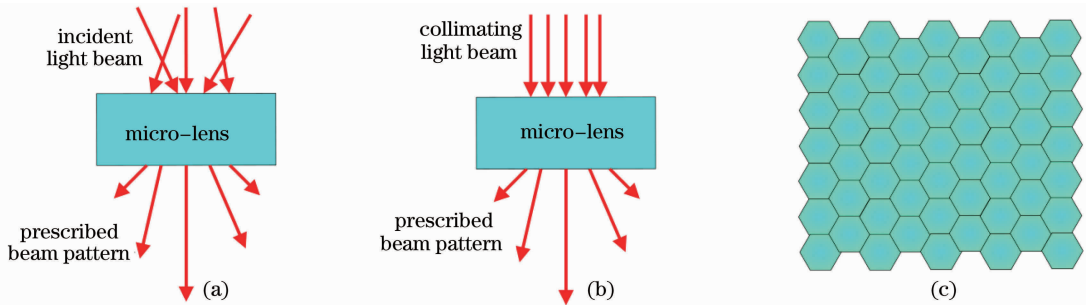


图 11 (a) LED 阵列发出的光杂乱地入射至微透镜表面; (b) 按准直光设计微透镜; (c) 无缝拼接

Fig. 11 (a) Micro-lens is disorderly illuminated by the LED array; (b) design the micro-lens with collimating incident light; (c) seamless splice

图 12 为最终的面光源样品,其由 4 个模块组成,整灯的光能利用率为 88.1% (针对 $-20^\circ \sim +20^\circ$ 发光角的草帽型小功率 LED),平均光出射度为 0.046 lm/mm^2 ,与荧光灯的光出射度处于相同的量级,有效地降低了眩光。



图 12 基于微结构散光板的 LED 面光源

Fig. 12 LED surface light source based on the micro-lens diffuser

常规功率型 LED 具有 180° 朗伯型发光特性和一定的尺寸(约 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$),偏离理想点光源,使得同时实现均匀和准直面临巨大的挑战,已有的解决方案难以兼顾效率、均匀和准直。根据以上提出的非成像光学系统设计方法,在获得逼近理论极限的出光均匀性和准直特性的同时,保证了系统的高效率,主要技术创新包括:

1) 提出了由多个光学曲面构成的多种照度均匀的准直光学系统结构^[20,21]。其一为一体化的均匀准直光学系统,通过采用具有旋转对称性的、正 N 边形的准直透镜封装 LED 芯片,使得 LED 芯片出射的光经过准直系统后以较小的发散角度出射,形成定向发射的、正 N 边形的面光源模块;其优点还表现在多个正 N 边形照明模块可以实现无缝拼接,从而获得满足实际需要的大光通量照明光源。其二为复合式的均匀准直光学系统,如图 13 所示,LED(121)发出的光经一次光学透镜(122)与二次光学透镜(120)的光束整形,均匀准直地从出射平面(123)出射;图 13(b)为通过将(a)制造成六角形,而形成的具有均匀准直特性的可无缝拼接的照明光源模组。通过上述创新,在保证出光均匀性和准直度的前提下,将 LED 高亮度光源的效率提高到 86% 以上,已经成功应用于手术用无影灯、射灯和投影仪

6 特种照明设计应用

高亮度特种照明(如舞台投光灯)不仅要求光束角窄,而且要求光分布均匀度高、光学系统效率高。

等领域中。

2) 提出了新型高效航标指示光源^[22]。项目组提出将 LED 的输出光分布设计为在垂直方向上准直、而在水平方向上光强在 120°或 60°内角向均匀的光学系统设计理念,并基于前述创新设计方法,获

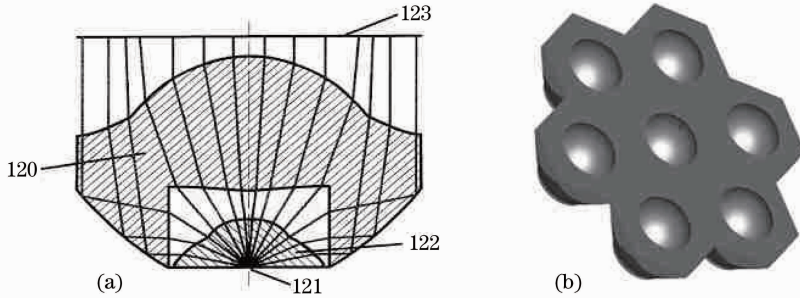


图 13 复合式均匀准直 LED 二次光学系统。(a) 结构;(b) 无缝拼接

Fig. 13 Composite uniform collimated LED secondary optical system. (a) Structure; (b) seamless splice

7 结 论

在 ANSI 提出的白光 LED 色度规范内进行光视效能和显色指数总体优化,当采用峰值波长分别为 462,543 和 609 nm 的红、绿、蓝三色 LED 时,通过变化混合比例所能实现的任意白光光谱的显色指数皆大于 80,其极限流明效率高达 430 lm/W,因此,采用窄线宽的三色混光是半导体照明的发展趋势之一。

LED 应用于通用照明,必须利用光学系统对 LED 发出的光进行重新分配,这属于三维给定光分布设计问题,提出基于分离变量的非成像光学设计理论,即基于分离变量方法得到 LED 发光球面坐标和目标照射平面坐标对应关系,并根据递推法和矢量反射/折射定律确定表面离散数据点坐标及其法向矢量。为了消除自由曲面表面误差和光源的扩展性等对给定照度分布的影响,提出了反馈迭代方法。面向道路照明,提出了系统的按亮度设计自由曲面光学系统的方法,基于余弦基函数的配光分布优化以及反馈迭代法获得实现照明效果优异的自由曲面配光系统,经实际道路测试,比市售高压钠灯节电 50%以上。面向室内照明,基于非成像光学理论设计了具有一体微透镜的散光板,其光能透射率达 88.1%以上,使半导体照明光源的光出射度降低到与荧光灯同一量级,较为有效地减弱了眩光效应,并引入了模块化思想以降低 LED 室内光源的维修成本。面向特种照明,在保证出光均匀性和准直度的前提下,发明了由多个光学曲面构成的多种照度均匀的准直光学系统结构,将 LED 高亮度光源的效率

得了具有自主知识产权的 LED 模块,利用 3 个或 6 个 LED 模块拼接成 360°角发光光源。这种新型航标指示光源无机械转动装置,具有光强分布均匀、高效节能等突出优势。

提高到 86%以上,已经成功应用于手术用无影灯、射灯、投影仪和航标指示照明等领域中

未来的半导体照明,是人眼舒适、环境友好、高光效和色品适中等多种特性的统一。半导体照明已经在许多方面展现了与传统照明迥异的特性,半导体照明中的光学仍然有巨大的发展空间,有待进一步探索。

参 考 文 献

- 1 Optoelectronics Industry Development Association. Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination [M]. Washington, DC: OIDA, 2001
- 2 U. S. Department of Energy. Solid-State Lighting Research and Development [M]. Washington, DC: EERE, 2010
- 3 CIE (Commission Internationale de l'Eclairage).. Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources [S]. CIE 13.3, 1995, 1~27
- 4 J. Chaves. Introduction to Nonimaging Optics [M]. Chapter 3, Boca Rato: CRC Press, 2008. 55~115
- 5 R. Mirhosseini, M. F. Schubert, S. Chhajed *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
- 6 R. Mueller-Mach, G. Mueller. White light emitting diodes for illumination [C]. *SPIE*, 2000, **3938**: 30~41
- 7 A. Zukauskas, R. Vaicekuskas, F. Ivanauskas *et al.*. Optimization of white polychromatic semiconductor lamps [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(2): 234~237
- 8 American National Standard for Electric Lamps-Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products [S]. ANSI, C78.377, 2008
- 9 R. Winston, J. C. Minano, P. Benitez. Nonimaging Optics [M]. Burlington: Elsevier, 2005. 173~178
- 10 J. S. Schruben. Formulation a reflector-design problem for a lighting fixture [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(12): 1498~1501
- 11 L. Wang, K. Y. Qian, Y. Luo. Discontinuous free-form lens design for prescribed illuminance [J]. *Appl. Opt.*, 2007,

- 46(18): 3716~3723
- 12 Luo Yi, Qian Keyuan, Wang Lin *et al.*. Design Method of Three-Dimensional Optical Lens and Lens [P]. China Patent, CN 1928624A, 2007
罗毅, 钱可元, 王霖等. 一种三维光学透镜的设计方法及透镜[P]. 中国专利, CN 1928624A, 2007
- 13 Y. J. Han, X. P. Zhang, Z. X. Feng *et al.*. Variable-separation three dimensional freeform nonimaging optical system design based on target-to-source mapping and micro belt surface construction [J]. *Sciencepaper Online*, 2010, **5**(1): 1~9
- 14 Y. Luo, Z. X. Feng, Y. J. Han *et al.*. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9055~9063
- 15 W. C. Situ, Y. J. Han, H. T. Li *et al.*. Combined feedback method for designing a free-form optical system with complicated illumination patterns for an extended LED source [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(S5): A1022~A1030
- 16 CIE (Commission Internationale del'Eclairage). Road Surfaces and Lighting [S]. CIE Publication 66, Paris, 1984
- 17 A. Pachamanov, D. Pachamanova. Optimization of the light distribution of luminaires for tunnel and street lighting [J]. *Engineering Optimization*. 2008, **40**(1): 47~65
- 18 Z. X. Feng, Y. Luo, Y. J. Han. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 9055~9063
- 19 CIE (Commission Internationale del'Eclairage). Discomfort glare in interior lighting[S]. CIE 117, 1995, 1~41
- 20 Luo Yi, Qian Keyuan, Hu Fei. Novel Alignment Light Emitting Diode Packaging Construction [P]. China Patent, CN 1604346A, 2005
罗毅, 钱可元, 胡飞. 新型准直发光二极管封装结构[P]. 中国专利, CN 1604346A, 2005
- 21 Luo Yi, qian Keyuan, Yang Yi *et al.*. Face Light Source Module Based on LED [P]. China Patent, CN 100508222C, 2005
罗毅, 钱可元, 杨毅等. 基于发光二极管的面光源模块[P]. 中国专利, CN 100508222C, 2005
- 22 Luo Yi, Qian Keyuan, Wang Lin. Navigation Mark Lamp Unit and Its Uses [P]. China Patent, CN 101078494A, 2007
罗毅, 钱可元, 王霖. 一种航标灯单元[P]. 中国专利, CN 101078494A, 2007