

文章编号: 1001-3806(2011)06-0857-04

## 反射式 LED 二次光学系统研究

葛卫龙<sup>1</sup>, 张晓晖<sup>1</sup>, 徐翔<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033; 2. 海军装备部 广州军事代表局, 昆明 650031)

**摘要:** 为了解决发光二极管(LED)应用于照明时光照不均匀的问题, 运用非成像光学和几何光学的基本原理, 推导了反射式 LED 二次光学系统的设计步骤, 设计了 LED 二次光学系统, 并对其光照均匀性进行了仿真。针对仿真显示的问题对设计步骤进行了改进, 利用改进后的方法重新设计了二次光学系统, 并利用光学设计软件对设计的光学系统进行仿真。结果表明, 这种二次光学系统能够达到均匀照明的效果。

**关键词:** 几何光学; 非成像光学; 发光二极管照明; 二次光学系统

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3969/j. issn. 1001-3806. 2011. 06. 035

### Study on LED reflecting secondary optical system

GE Wei-long<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>1</sup>, XU Xiang<sup>2</sup>

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033; 2. Military Representatives Office in Guangzhou, Navy Equipment Department, Kunming 650031, China)

**Abstract:** For solving the problem of non-uniformity of light emitting diode(LED) illumination, based on basic principles of non-imaging optics and geometric optics, the design procedure of a LED reflecting secondary optical system was deduced. Then a LED reflecting secondary optical system was designed and its illumination uniformity was simulated. Aiming at the problem reflected by the simulation result, the designing procedure was improved. Then the secondary optical system was redesigned, the result of simulation shows this optical system can achieve the illumination uniformity.

**Key words:** geometry optics; non-imaging optics; light emitting diode illumination; secondary optical system

### 引言

由于发光二极管(light emitting diode, LED)本身发光特性近似于朗伯光源, 应用于照明时必须解决照明不均匀的问题。在通用照明中光学系统的设计与光通信中有很大的不同<sup>[1]</sup>。照明灯具的光学系统的主要作用就是改变光源本身的光线传播方向, 使其在照明面上实现特定的光强分布, 对 LED 照明而言, 就是要实现照明面照度的均匀分布。如果光源相对于光学系统很小的话, 设计光学系统时就可以将光源看作点光源, 这时就可以用很多传统的设计方法来设计光学系统<sup>[2-3]</sup>。但是很多学者<sup>[4-5]</sup>已经分析过 LED 远场起点为 20mm, 即距离 LED 大于 20mm 的地方才可以将 LED 看作点光源, 而二次光学系统与 LED 之间的距离大多小于这个值, 因此需要将 LED 看作扩展光源。作者以 LED 为扩展朗伯光源为基础, 推导了反射式 LED 二次光学系统的设计步骤, 设计了能够实现均匀照明

的二次光学系统。

### 1 二次光学系统设计推导

如图 1 所示, 假设  $OQ$  为光源, 光源的两边是反射光学系统, 也即两面镜子, 镜子与水平面的夹角为  $\pi/4$ , 设顺时针方向为正方向, 图中的  $\theta$  角可以表示为  $-|\theta|$ 。对照明面上  $-|\theta|$  方向上的点, 光源的光强为:

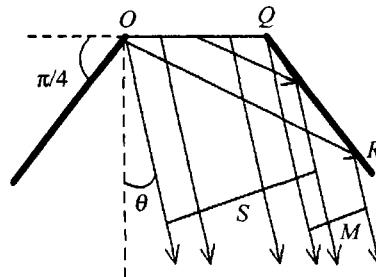


Fig. 1 Extended source and optical system

$$I_s = L \overline{OQ} \cos\theta = LS \quad (1)$$

式中,  $L$  表示光源的亮度,  $OQ$  是光源的长度,  $S = \overline{OQ} \cos\theta$  表示在  $-|\theta|$  方向光源的实际范围。

但是在  $-|\theta|$  方向不仅仅有来自光源的光, 还有来自光源通过反光镜所成像的光, 在图中则表现为  $M$  部分的光。这部分的光在  $-|\theta|$  方向上的光强为:

作者简介: 葛卫龙(1979-), 男, 讲师, 主要研究领域为水下光电探测和图像处理。

E-mail: gnvorvv@gmail.com

收稿日期: 2011-11-16; 收到修改稿日期: 2011-05-05

$$I_M = LM \tag{2}$$

因此,在  $-\theta$  方向总的光强为<sup>[6]</sup>:

$$I(\theta) = I_M(\theta) + I_S(\theta) = L(M + S) \tag{3}$$

当反光镜的倾斜角度变化时,其影响范围也随之变化。反光镜的倾角的设置应该满足这样的条件:即照明面中心光源垂直投影部分应该只有来自光源的光,而其它部分则既有光源的光又有反光镜反射的光。实际上,当光源边缘的光线在反光镜的边缘反射后的反射光线竖直,即满足这个条件<sup>[7]</sup>。这是在设计 LED 的二次光学系统时必须满足的一个边缘条件。

在设计反光镜时需要得到它的表达式,为此建立如下的坐标系:以光源的一个端点  $O$  为原点,光源为  $x$  轴,竖直方向为  $y$  轴, $O$  点到  $R$  点的距离为  $r$ , $r$  与  $y$  轴的夹角为  $\phi$ ,如图 2a 所示。图 2b 则表达了  $\phi$  与  $\theta$  的关系,由于入射光线与法线的夹角等于反射光线与法线的夹角,因此,它们之间的夹角必然是某个角的两倍,设这个角为  $\alpha$ 。

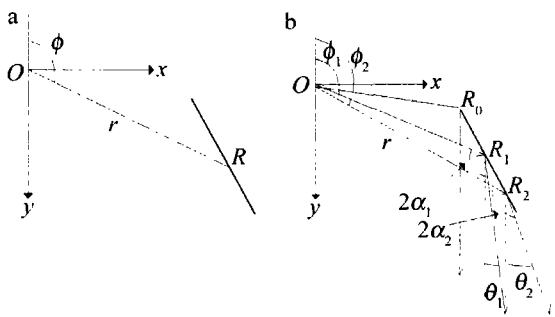


Fig. 2 The coordinate system used in the design of the optical system  
a—coordinate system b—the relation between  $\phi$  and  $\theta$

光源的尺寸仅仅表达了它的范围,因此不失一般性设为 1。设光源的亮度为  $L$ ,根据前面的推导,要得到均匀照明,即要使光强分布为  $I(\theta) = L/\cos^2\theta$ ,如果令  $L=1$ ,则光强分布为  $I(\theta) = 1/\cos^2\theta$ 。

为了得到反光镜产生的光强,定义  $p$  函数如下:

$$p = r\sin 2\alpha \tag{4}$$

通过  $p$  函数就可以得到反光镜产生的光强。在图 3 中,反光镜在  $\theta$  方向产生光强的部分为  $R_0$  到  $R$  之间,在  $\theta$  方向产生的光强为<sup>[8]</sup>:

$$I_M = r\sin 2\alpha - r_0\sin 2\alpha_0 = p - p_0 \tag{5}$$

在图 3 中, $r$  是一条从  $O$  发射的光线并在  $R$  反射,而  $r_0$

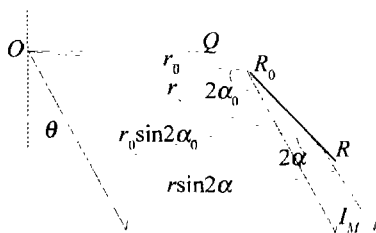


Fig. 3 The definition of the  $p$ -function

则不是  $O$  点的光线,因为根据前面得出的边缘条件, $O$  发射的光线在  $R_0$  点必须竖直, $r_0$  仅仅代表从  $O$  点到  $R_0$  点的距离。可以得到  $p_0(\theta) = r_0\sin 2\alpha_0(\theta)$ ,在  $R$  点, $p(\theta) = r\sin 2\alpha(\theta)$ 。因此  $\theta$  方向总的光强为:

$$I(\theta) = I_M(\theta) + I_S(\theta) = r\sin 2\alpha(\theta) - r_0\sin 2\alpha_0(\theta) + I_S(\theta) \tag{6}$$

如果  $O$  点的光线在反光镜较低的点反射为竖直光线,则反光镜产生的光强变为:

$$I_M(\theta) = p_0(\theta) - p(\theta) \tag{7}$$

此时  $\theta$  方向总的光强为:

$$I(\theta) = I_M(\theta) + I_S(\theta) = r\sin 2\alpha(\theta) - r_0\sin 2\alpha_0(\theta) + I_S(\theta) \tag{8}$$

从图 2 坐标系的定义可以得到:

$$2\alpha = \phi - \theta \tag{9}$$

上式中的  $\theta$  是定义了方向的。前面已经讨论了不同的  $\phi$  对应不同的  $\theta$ ,因此可以定义函数  $\phi(\theta)$ ,所以  $r(\phi) = r(\phi(\theta)) = r(\theta)$ ,通过(9)式又可以得到  $\alpha(\theta)$ ,代入(4)式可得:

$$p(\phi) = r(\phi)\sin(\phi - \theta) \Rightarrow p(\theta) = r(\theta)\sin 2\alpha(\theta) \tag{10}$$

据此可以得到反光镜的表达式为:

$$r(\theta) = \frac{p(\theta)}{\sin 2\alpha(\theta)} \tag{11}$$

只要知道  $p(\theta)$  和  $\alpha(\theta)$  就可以计算出反射镜的面型。由(6)式~(10)式可得在边缘光线在较高的点反射竖直时:

$$p(\theta) = I(\theta) + r_0\sin(\phi_0 - \theta) - I_S(\theta) \tag{12}$$

而在较低的点反射竖直时:

$$p(\theta) = I(\theta) + r_0\sin(\phi_0 - \theta) - I_S(\theta) \tag{13}$$

(12)式和(13)式中, $\phi_0$  和  $r_0$  是初始条件,由(9)式又可得  $2\alpha_0(\theta) = \phi_0 - \theta$ 。若要求取反光镜的面型,则必须求出  $\alpha(\theta)$ ,为此考虑图 4a 所示的情况,设在  $O$  点光源的一个微元  $dA$  发出的两束夹角为  $d\phi$  的光线,令  $OA = r$ ,则  $AC = rd\phi$ 。由于  $d\phi$  非常小,因此这两束光线可以认为是平行的,如图 4b 所示,可得  $BC = dr$ 。此时  $AC$  垂直于  $BC$ ,因此可以得到:

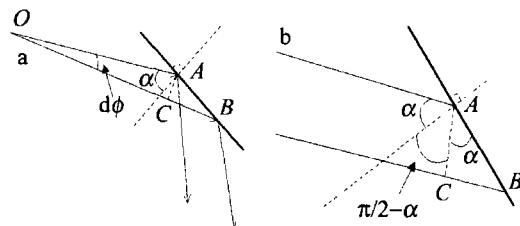


Fig. 4 The sketch map of calculating  $\alpha$   
a—two beam emitted from  $O$  b—assuming two parallel beams

$$\tan \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{dr}{rd\phi} \Rightarrow \frac{1}{r} \frac{dr}{d\phi} =$$

$$\tan\alpha \Rightarrow \frac{d\ln r}{d\phi} = \tan\alpha \quad (14)$$

由(9)式、(10)式和(14)式可得:

$$\alpha(\theta) = \arctan \frac{P(\theta)}{P(\theta) - C_m} \quad (15)$$

如果边缘光线在较高点反射竖直,则  $P(\theta)$  为:

$$P(\theta) = \int p(\theta) d\theta = \int I(\theta) d\theta + r_0 \cos(\theta - \phi_0) - \int I_s(\theta) d\theta \quad (16)$$

如果边缘光线在较低点反射竖直,则  $P(\theta)$  为:

$$P(\theta) = \int p(\theta) d\theta = - \int I(\theta) d\theta + r_0 \cos(\theta - \phi_0) - \int I_s(\theta) d\theta \quad (17)$$

(15)式中的常数  $C_m$  需要通过初始条件来求取。其中  $\theta_0$  是边缘光线在反射镜边缘反射后的光线与竖直方向的夹角,由前面的初始条件可得  $\theta_0 = 0$ 。又  $\alpha_0 = (\phi_0 - \theta_0)/2$ ,因此可以得到:

$$C_m = P(\theta_0) - \frac{p(\theta_0)}{\tan[(\phi_0 - \theta_0)/2]} = P(\theta_0) - \frac{p(\theta_0)}{\tan[\alpha(\theta_0)]} \quad (18)$$

至此反射镜的面型就可以求解了。设  $r_0$  点的坐标为  $(O_1, O_2)$ ,则反射镜上点的坐标为:

$$R(\theta) = (O_1, O_2) + r(\theta) (\sin(2\alpha(\theta) + \theta), -\cos(2\alpha(\theta) + \theta)) \quad (19)$$

## 2 LED 二次光学系统设计

推导了设计二次光学系统的计算步骤之后,接下来就可以根据实际情况设计二次光学系统了。首先需要假设 LED 是朗伯发射体;其次,尽管 LED 芯片有封装透镜,不是一个平的光源,但是由于 LED 芯片很小,因此假设 LED 为平光源,见图 5。

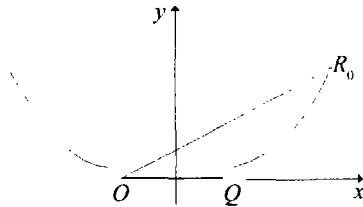


Fig. 5 The sketch map of the design of a secondary optical system

这里设计的二次光学系统的类型是边缘光线在远端反射竖直的反射镜,在图 5 中假设光源的两端分别在  $O$  和  $Q$  两点,  $R_0$  的坐标作为已知条件是已知的,编制计算光学系统面型的程序,计算出反光镜上 100 个点的坐标。得到这些坐标之后,导入机械设计软件 SOLIDWORKS 中画这些离散的点,然后用 SOLIDWORKS 的样条曲线功能将这些点连起来,通

过旋转得到反光镜实体。图 6 所示是在 SOLIDWORKS 中得到的反光镜的 3 维图。至此就已经完成了二次光学系统的设计工作。

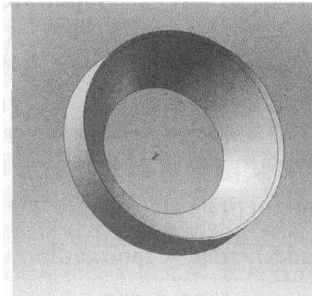


Fig. 6 The 3-D picture of the reflector

## 3 LED 照明灯具二次光学系统仿真

设计了 LED 的二次光学系统之后,对设计的光学系统进行仿真验证。仿真采用的软件是通用的照明设计软件 TRACEPRO。仿真之前首先需要建立 LED 的实体模型,依据 LED 厂商提供的数据在 TRACEPRO 中建立 LED 的模型,并根据这些数据设置 LED 的发光特性。图 7a 是照明面上的等照度图,灰度相同表示照度相同,越亮的地方表示照度越大。照明面设置在距离光源 2.5m,面积为 4m × 4m。图 7b 是 2 维照度分布图。从照度分布图中可以看出照明面上的照度分布并不十分均匀。在照明中心 1.2m 的范围内最大照度为 17.5322lx,最小照度为 4.5167lx,得出此时的均匀性为 4.5167/17.5322 ≈ 0.2576。分析这种不均匀性产生的原因,应该是设计之前假设 LED 为平面光源所致。

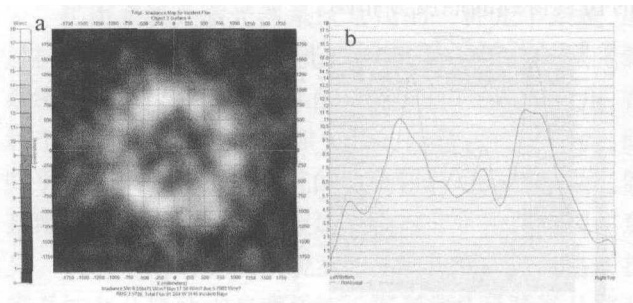


Fig. 7 The simulated irradiance distribution

a—the equi-irradiance distribution b—the 2-D irradiance distribution

## 4 LED 二次光学系统设计的改进

前面设计的二次光学系统是建立在 LED 是平面光源假设之上的,这是光照不均匀的主要原因,为此本节中假设 LED 的是一个半圆形(截面)的光源。目前已经有多种针对圆形光源的设计方法<sup>[9-11]</sup>,以此为基础,推导出半圆形光源的设计公式。

图 8 所示是半圆形光源示意图,两束光线从光源的边缘发出,设光源的半径为  $a$ ,这种情况下

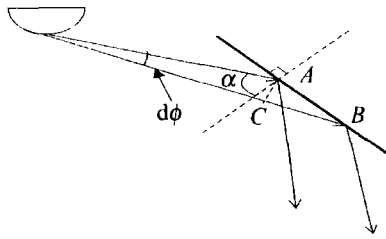


Fig. 8 The sketch of a semi-circle source

(9)式依然成立。从图中可以看出,  $CB = dr - ad\phi$  以及  $AC = rd\phi$ , 因此, 可以得到:

$$(dr - ad\phi)/rd\phi = \tan\alpha \Rightarrow d\ln r/d\phi = \tan\alpha + a/r \quad (20)$$

式中, 如果  $a = 0$  话就是前面平光源的情况了。此外  $p$  函数的表达式也要更新, 这种情况下可得:

$$p(\theta) = (r + a/\tan\alpha)\sin(2\alpha) \quad (21)$$

反光镜产生的光强  $I_M$  依然要分为两种情况讨论, 即边缘光线在较近的边缘反射竖直和在较远的边缘反射竖直。当边缘光线在较近的边缘反射竖直时:

$$I_M = (r + a/\tan\alpha)\sin(2\alpha) - (r_0 + a/\tan\alpha_0) \times \sin(2\alpha_0) = p(\theta) - p(\theta_0) \quad (22)$$

当边缘光线在较远的边缘反射竖直时:

$$I_M = (r_0 + a/\tan\alpha_0)\sin(2\alpha_0) - (r + a/\tan\alpha) \times \sin(2\alpha) = p(\theta_0) - p(\theta) \quad (23)$$

此时常量  $C_m$  变为:

$$C_m = P(\theta) - [p(\theta) - 2\alpha] \times \cot\alpha - 2a\arctan(\cot\alpha) \quad (24)$$

以上就是在光源形状为半圆时的设计式, 此时的设计与仿真过程与前面相同, 在这里不再赘述。图 9 是此时仿真得到的照度分布图。

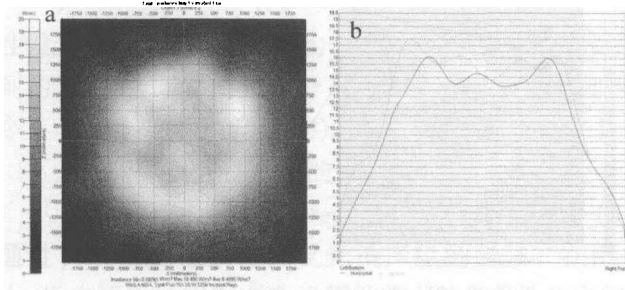


Fig. 9 The simulated irradiance distribution after improvement  
a—the equi-irradiance distribution b—the 2-D irradiance distribution

从照度分布可以看出, 此时照明是比较均匀的, 在照明中心 1.2m 的范围内最大照度为 19.4671lx, 最小照度为 12.7152lx, 得出此时的均匀性为  $12.7152/19.4671 \approx 0.6551$ , 较前面有较大幅度的提升。

### 5 实验

为了验证这种二次光学系统的设计方法, 设计并制作了实验样灯, 样灯设计如图 10 所示, 由 15 个 LED

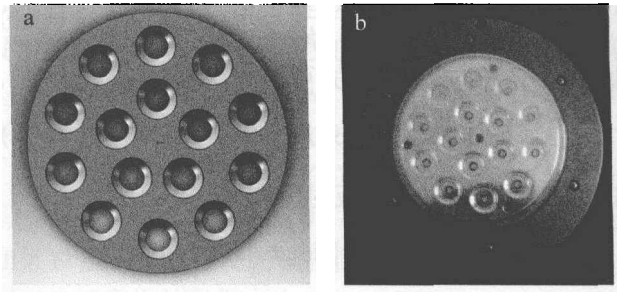


Fig. 10 The LED lamp used in experiments  
a—the designing figure of a LED lamp b—the LED lamp

构成, 每个 LED 芯片均加上前述的二次光学系统构成一个 LED 灯。

图 11 是实验测量的 LED 灯照度分布图, LED 灯的最大照度基本符合设计时的仿真结果, 均匀照明区域有所下降, 在照明面中心 1.2m 之内最大照度为  $E_{\max} = 79.81\text{lx}$ , 最小照度为  $E_{\min} = 45.37\text{lx}$ , 均匀性为  $45.37/79.81 \approx 0.598$ 。实测的均匀性相比仿真结果有所下降, 但是仍然达到了设计要求, 验证了这种设计方法。

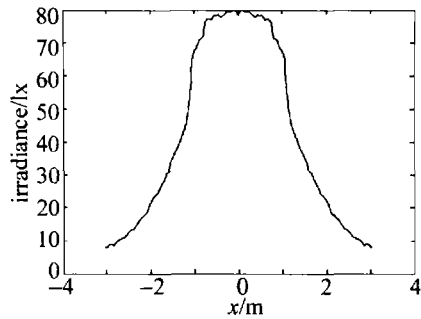


Fig. 11 The irradiance distribution of the LED lamp

### 6 小结

首先论述了针对平面朗伯扩展光源的均匀照明设计方法, 并假设 LED 为平面朗伯光源设计了反射式的二次光学系统, 通过科学计算软件 MATLAB 编程计算了反光面的面型数据, 然后利用实体建模软件 SOLIDWORKS 将计算得到的面型数据生成光学系统, 利用照明设计软件 TRACEPRO 对这种二次光学系统的照明效果进行了仿真, 仿真结果表明, 假设 LED 为平面光源, 则设计的二次光学系统很难达到均匀照明的效果。因此仍然假设 LED 为半圆形的光源, 并针对半圆形对前面的设计原理进行了改进, 利用改进的方法重新设计了二次光学系统, 结果证明其达到了均匀照明的效果。最后根据这种设计方法设计并制作了一台样灯, 实验测量了照度分布, 验证了这种方法的有效性。

(下转第 864 页)

而  $\Delta l$  一样时,导致平顶光束通过短焦距扩束系统后在输出面就保持了平顶分布,而长焦距扩束系统只有达到一定传输距离时才获得平顶分布光束。

因此,在实际应用过程中,可根据扩束系统焦距参量计算满足  $B=0$  时的理想传输距离  $l_0$ ,再根据选用扩束系统放大倍数其可调节范围选取合适的接收面距离就可以获得均匀分布的光束,这是在实际应用中非常重要的。

### 3 小结

以柯林斯公式为理论工具,推导了平顶高斯光束通过扩束系统的传输解析式,并利用解析式研究了平顶高斯光束通过伽利略式和开普勒式这两种常见扩束系统的传输特性,得到如下结论:平顶高斯光束通过不同的扩束系统的传输特性不同,并且不同焦距的扩束系统,平顶高斯光束扩束后的传输特性也不同。对于短焦距的扩束系统,只有在近场内可得到与输入场分布一致的平顶光束,而远场光强分布发生畸变。而在长焦距下,伽利略式扩束系统在近场内光强分布只有中心部分保持平顶,边缘分布有畸变;对于开普勒式扩束系统,在近场内光束不是平顶分布,而是边缘光强大中心光强小,直至传输到一定范围内,横截面光强分布又恢复到平顶分布,并且这个范围和所选扩束系统的放大倍数相关,放大倍数越大,轴向范围就越大。

### 参考文献

- [1] GORI F. Flattened Gaussian beams [J]. Optics Communication, 1994,107(5):335-341.
- [2] LÜ B D, LUO Sh R. General propagation equation of flattened Gaussian beams[J]. Journal of the Optical Society of America, 2000, A17(11):2001-2004.
- [3] LUO Sh R, LÜ B D. Propagation of flattened-Gaussian beams in uniaxial crystals[J]. Acta Phycica Sinica, 2004, 53(9):2947-2952(in Chinese).
- [4] GE D, CAI Y J, LIN Q. Partially coherent flat-topped beam and its propagation[J]. Applied Optics, 2004, 43(24):4732-4738.
- [5] LUO Sh R, LÜ B D, ZHANG B. Propagation characteristics of flattened Gaussian beams[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(9):1213-1217(in Chinese).
- [6] WU P, ZHUANG J, LÜ B D. A new method for producing flat-topped beams: Hermite-Gaussian beam combination [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 31(1):48-52(in Chinese).
- [7] JIA X M, XIE X L. Propagation property of Gaussian beams passing through spatial filter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(9):1220-1224(in Chinese).
- [8] JI X L, LÜ B D. Focal shifts of flattened Gaussian beams passing through an aperture lens[J]. Laser Technology, 2003, 27(1):55-57(in Chinese).
- [9] HU L, CAI Y J. Analytical formula for a circular flattened Gaussian beam propagating through a misaligned paraxial ABCD optical system [J]. Physics Letters, 2006, A360(2):394-399.
- [10] LÜ B D. Laser optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003:40-44(in Chinese).
- [11] COLLINS S A. Lens-system diffraction integral written terms of matrix optics[J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(7):1168-1177.

(上接第 860 页)

### 参考文献

- [1] JIN W, ZHANG H T, GONG M L, *et al.* Nonimaging concentrators in optical wireless communications[J]. Laser Technology, 2003, 27(4):311-316(in Chinese).
- [2] WINSTON R, WOOD F S. Nonimaging reflectors as functionals of the desired irradiance [J]. Journal of the Optical Society of America, 1993, A10(9):1902-1908.
- [3] ELMER W B. The optical design of reflectors[M]. New York: Wiley, 1980:27-30.
- [4] SUN C C, LEE T X, MA S H, *et al.* Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region[J]. Optics Letters, 2006, 31(14):2193-2195.
- [5] MORENO I, SUN C C. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. Optics Express, 2008, 16(3):1808-1819.
- [6] RABEL A. Edge-ray method for analysis of radiation transfer among specular reflectors[J]. Applied Optics, 1994, 33(7):1248-1259.
- [7] RABEL A, GORDON J M. Reflector design for illumination with extended sources; the basic solutions [J]. Applied Optics, 1994, 33(25):6021-6021.
- [8] LIU J. Design and study of the LED illumination system[D]. Yan'an University, 2009:35-37(in Chinese).
- [9] RIES H, WINSTON R. Tailored edge-ray reflectors for illumination [J]. Journal of the Optical Society of America, 1994, A11(4):1260-1264.
- [10] ONG P T, GORDON J M. Tailored lighting reflectors to prescribed illuminance distributions: compact partial-involute designs[J]. Applied Optics, 1995, 34(34):7877-7887.
- [11] ONG P T, GORDON J M, RABEL A. Tailored edge-ray designs for illumination with tubular sources [J]. Applied Optics, 1996, 35(22):4361-4371.