

荧光偏振免疫分析仪光源准直系统设计

胡文波^{1,2} 巩岩¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对荧光偏振免疫分析仪对光源的需求, 提出使用发光二极管(LED)作为激发光源并设计了口径小、结构紧凑且准直度高的配光系统。根据LED的发光特性, 采用折射自由曲面和反射自由曲面组合的方式实现对光源的准直。利用几何光学理论建立光源与目标面之间的关系方程确定面型参数。仿真分析结果表明, 对1 mm×1 mm LED面光源可以实现发散角为±2.4°的准直照明, 系统能量利用率可达85%以上。实现了结构紧凑、准直性能高的设计目标, 为荧光偏振免疫分析仪激发光学系统的小型化提供了一种有效的设计方案。

关键词 光学设计; 非成像光学; 荧光偏振免疫分析仪

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112204

Design of Collimating Illumination for Fluorescence Polarized Immunoassay Analysis Device

Hu Wenbo^{1,2} Gong Yan¹

¹State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the requirements of light source used in fluorescence polarized immunoassay analysis device, light emitting diode (LED) is proposed to use as stimulating source and illuminating system with small size, compact structure and high collimation is designed. Referring to the luminous characteristics of LED, a new system combined with refractive and reflective freeform surfaces is designed for collimating. Equations between the source and target surfaces are presented through the theory of geometrical optics to get the surface parameters. The simulation results show that the collimating system can achieve ±2.4° diverging angel for a 1 mm×1 mm LED surface source with efficiency no less than 85%. Accomplishing the expected of compact construction and high collimation, the paper offers an effective reference for compact design of fluorescence polarized immunoassay analysis device.

Key words optical design; non-imaging optics; fluorescence polarized immunoassay analysis device

OCIS codes 220.4298; 230.3670; 220.2945

1 引言

荧光偏振免疫分析(FPIA)是一种将荧光偏振原理和免疫分析原理结合起来的分析方法。采用FPIA原理制做而成的检测仪器称为荧光偏振免疫分析仪, 该类仪器被广泛应用于检测农药残留、食品添加剂、污染源以及防控传染病等方面^[1-2]。荧光偏振免疫分析仪的光学系统由两部分组成: 荧光激发光学系统和荧光检测光学系统。传统的荧光偏振免疫分析仪激发光学系统大多采用宽光谱的氙灯或卤素灯作为光源^[3]。由于适用于FPIA的荧光物质种类有限, 激发光源中有效光谱成分集中在几个特定波段, 因此采用宽光谱光源能量利用率较低。发光二极管(LED)不仅具有体积小、效率高、寿命长、无污染等优点, 还具有能量高、带宽窄

收稿日期: 2015-05-13; 收到修改稿日期: 2015-06-19; 网络出版日期: 2015-10-20

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20140203001GX)

作者简介: 胡文波(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: huwb113@163.com

导师简介: 巩岩(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事短波光学、光学系统设计和成像光谱技术方面的研究。

E-mail: gongy@sklao.ac.cn

的特点。因此采用LED作为激发光源,并设计适用于荧光偏振免疫分析仪的光源准直配光系统。

自由曲面可以根据设计要求任意配光并且可以有效控制光线的传播角度,因而被广泛应用于LED照明光学系统中^[4]。目前自由曲面准直透镜的设计方法主要有数值计算方法和优化设计方法。数值计算方法是指根据设计目标与光学条件建立面型的偏微分方程组并进行求解^[5-7],此方法的求解比较复杂;优化设计方法是指通过编程软件和光学软件的交互式调用或利用光学设计软件建立评价函数和优化函数,实现对自由曲面的优化^[8-11],此方法的初始结构需依靠设计者的经验来确定并且优化过程需花费大量的时间。本文采用几何光学理论^[12-14]与B样条插值方法^[15]建立自由曲面,不仅避免了复杂的数值计算并且不依赖于任何优化软件,可以快速得到理想的系统结构。

2 准直配光系统结构

全内反射透镜(TIR)被广泛应用于照明领域。采用折射自由曲面和全内反射自由曲面组合的方式实现光源准直,结构如图1所示,系统结构关于光轴旋转对称,由5个面构成:折射曲面I、折射平面II、平面III、反射曲面IV和出射平面V,其中I、IV为待求自由曲面,II、V为普通折射平面。曲面I与平面II的交点为P,光源O与P点的连线与光轴的夹角为 β ,光源发出的光被OP分为两部分:出射角小于 β 的光线经曲面I折射后平行于光轴出射;出射角大于 β 的光线经平面II折射、曲面IV反射后平行于光轴出射。由图1可知,角度 β 与光源到曲面I顶点的距离 d 共同决定了曲面I和平面V的口径大小。通常平面II相对于光轴方向有 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的角度倾斜^[16],即图中的 α 。

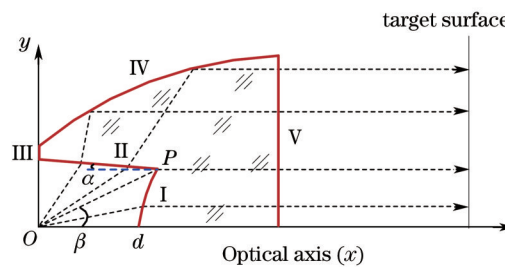


图1 准直系统结构

Fig.1 Structure of the collimator system

将图1所示的结构沿光轴旋转 360° 就可以得到配光系统的三维结构,透镜的材料使用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。

3 自由曲面的建立

自由曲面准直配光系统的建立分为两部分:自由曲面斜率的求解与自由曲面的构造。自由曲面斜率的求解是利用几何光学理论寻求曲面上任意点的切线向量,自由曲面的构造以此为基础通过求得离散点集、拟合曲线并旋转得到自由曲面。

3.1 自由曲面斜率的求解

1) 折射曲面I

光源O发出与光轴夹角小于 β 的光线经过曲面I上任意一点P发生折射,如图2所示,光线OP与光轴的夹角为 θ_p ,入射角为 θ_i ,折射角为 θ_t ,经曲面折射后光线与光轴的夹角为 θ'_p ,P点处的切线向量T与y轴夹角为 θ_T 。

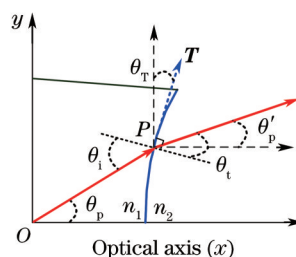


图2 折射曲面几何光学关系

Fig.2 Geometrical optics relation of the refractive surface

根据图2可知存在以下几何关系

$$\theta_i = \theta'_p + \theta_T, \quad (1)$$

$$\theta_i = \theta_p + \theta_T. \quad (2)$$

根据折射定律

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta'_p. \quad (3)$$

结合(1)、(2)、(3)式得P点的斜率为

$$K_p = \cot \theta_T = \frac{n_2 \cos \theta'_p - n_2 \cos \theta_p}{n_1 \sin \theta_p - n_2 \sin \theta'_p}. \quad (4)$$

根据准直配光要求,光线应平行于光轴出射,即 $\theta'_p = 0^\circ$,取空气折射率 $n_1 = 1$, (4)式化简为

$$K_p = \frac{n_2 - \cos \theta_p}{\sin \theta_p}. \quad (5)$$

2) 折射平面II~反射曲面IV

光源O发出的与光轴夹角大于 β 的光线经平面II折射并在曲面IV发生反射后出射。如图3所示,折射平面与光轴夹角为 α ,平面上任意一点M的入射光线OM与光轴的夹角为 θ_M ,经平面II折射后光线与光轴夹角为 θ_N 。根据折射定律以及图3所示的几何关系可得

$$\theta_N = \arccos \left[\frac{1}{n_2} \cos(\theta_M + \alpha) \right] - \alpha. \quad (6)$$

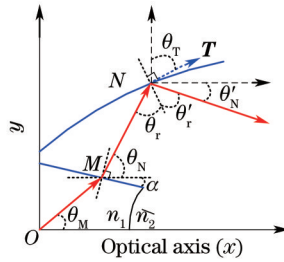


图3 折射-反射曲面几何光学关系

Fig.3 Geometrical optics relation of the refractive-reflective surfaces

光线MN入射到曲面IV的入射角为 θ_r ,反射角 θ'_r ,经曲面反射后光线与光轴夹角为 θ'_N ,N点切线向量T与y轴夹角为 θ_T ,根据图3可知存在以下几何关系

$$\theta_T = \theta'_r + \theta'_N, \quad (7)$$

$$\theta_r = \pi - \theta_N - \theta_T. \quad (8)$$

由反射定律可知 $\theta_r = \theta'_r$,故

$$\theta_T = \frac{\pi}{2} + \frac{\theta'_N - \theta_N}{2}. \quad (9)$$

由(9)式可得曲面IV上任意点N的斜率为

$$K_N = \cot \theta_T = -\tan \left(\frac{\theta'_N - \theta_N}{2} \right). \quad (10)$$

根据要求光线应平行与光轴出射,故 $\theta'_N = 0^\circ$,结合(6)式可得

$$K_N = \tan \left(\frac{\theta_N}{2} \right) = \tan \left\{ \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{1}{n_2} \cos(\theta_M + \alpha) \right] - \frac{\alpha}{2} \right\}. \quad (11)$$

3.2 自由曲面的构造

1) 折射曲面I

当 $0 < \theta_p \leq \beta$ 时,设有n条光线由折射曲面I折射后平行于光轴出射,每条光线的入射方向与光轴的夹角设为 $\theta_{pi}(i=0,1,2,\dots,n)$,与折射曲面的交点为 P_i 。当采样点数趋于无限大时,相邻采样点无限靠近,近似认为 P_{i+1} 点位于曲面上 P_i 点处的切线上。

如图4所示,设点 P_i 坐标为 (x_{pi}, y_{pi}) ,光线 OP_i 与光轴夹角为 θ_{pi} ,点 P_{i+1} 坐标为 (x_{pi+1}, y_{pi+1}) ,光线 OP_{i+1} 与光轴夹角为 θ_{pi+1} , P_i 点切线斜率 $K_{pi}=(n_2-\cos\theta_{pi})/(\sin\theta_{pi})$,得到以下递推关系

$$\begin{cases} x_{pi+1} = \frac{\tan\theta_{pi} - K_{pi}x_{pi}}{\tan\theta_{pi+1} - K_{pi}} \\ y_{pi+1} = \frac{1 - \cot\theta_{pi}K_{pi}}{1 - \cot\theta_{pi+1}K_{pi}} y_{pi} \end{cases}, \quad (12)$$

由此即可得到折射面上各点的坐标。

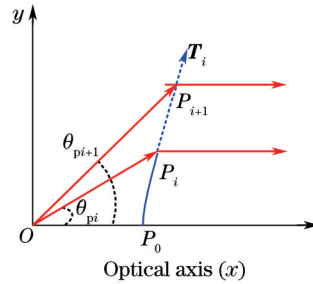


图4 折射曲面轮廓结构

Fig.4 Contour structure of the refractive surface

2) 折射平面II-反射曲面IV

光源发出大于临界角 β 的光线,即当 $\beta < \theta_m \leq \pi/2$ 时,光线经折射-反射曲面后平行于光轴出射。如图5所示,折射曲面的边界点 P_n 亦是折射平面的边界点,由此即可得到整个折射平面。仍然将 $(\beta, \pi/2]$ 角分为 n 份,每条入射光线与光轴的夹角设为 $\theta_{mi}(i=0, 1, 2, \dots, n)$,光线在平面上点 $M_i(x_{mi}, y_{mi})$ 发生折射,又经曲面上点 $N_i(x_{ni}, y_{ni})$ 反射后平行于光轴出射。

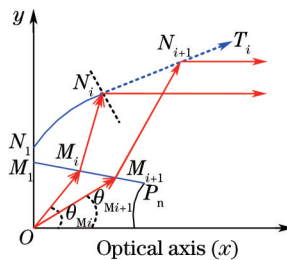


图5 折射-反射曲面轮廓结构

Fig.5 Contour structure of the refractive-reflective surface

由(6)式可知直线 $M_{i+1}N_{i+1}$ 斜率为

$$K_{M_{i+1}N_{i+1}} = \tan(\theta_{N_{i+1}}) = \tan\left\{\arccos\left[\frac{1}{n_2}\cos(\theta_{M_{i+1}} + \alpha)\right] - \alpha\right\}. \quad (13)$$

由(11)式可知点 N_i 的切线方程,切线与直线 $M_{i+1}N_{i+1}$ 相交于点 N_{i+1} ,由此可得点 N_{i+1} 坐标 (x_{ni+1}, y_{ni+1}) ,点 N_i 与点 N_{i+1} 有如下递推关系

$$\begin{cases} x_{ni+1} = \frac{1}{K_{M_{i+1}N_{i+1}} - K_{N_i}} (y_{N_i} - K_{N_i}x_{N_i} - y_{M_{i+1}} + K_{M_{i+1}N_{i+1}}x_{M_{i+1}}) \\ y_{ni+1} = \frac{1}{K_{M_{i+1}N_{i+1}} - K_{N_i}} (K_{M_{i+1}N_{i+1}}y_{N_i} - K_{M_{i+1}N_{i+1}}K_{N_i}x_{N_i} - K_{N_i}y_{M_{i+1}} + K_{M_{i+1}N_{i+1}}K_{N_i}x_{M_{i+1}}) \end{cases}, \quad (14)$$

其中 K_{N_i} 为反射曲面IV上任意点 N_i 的切线斜率, $K_{M_{i+1}N_{i+1}}$ 为直线 $M_{i+1}N_{i+1}$ 的斜率。由此即可求出反射曲面上各离散点的坐标。

将求得的折射曲面及反射曲面上的离散点集,通过二次B样条插值方法拟合成曲线,旋转 360° 即可得到自由曲面。

4 仿真与分析

准直配光系统的口径由分界角 β 与距离 d 共同决定, d 的取值要考虑到LED光源本身的厚度。根据递

推关系计算可知,取 $\alpha=0^\circ$ 时,分界角、距离与口径的关系如图6所示,当距离 d 一定时,随着分界角 β 的增大系统口径会变大。当角 β 一定时,距离 d 与系统的口径尺寸成线性关系。

荧光偏振免疫分析仪中激发光源的尺寸要与滤波片的尺寸相匹配,激发光源的口径要稍大于滤波片的直径,根据研发的仪器尺寸所选用滤波片直径为20 mm,故采用 $d=4\text{ mm}$ 、 $\beta=30^\circ$ 建立准直系统仿真模型,如图7所示。

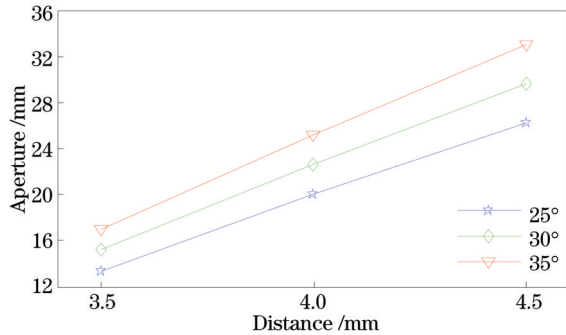


图6 系统口径与距离、分界角的关系

Fig.6 Relationship between diameter and distance、critical angle



图7 准直系统结构

Fig.7 Structure of the collimator system

将准直配光系统模型导入光学仿真软件中,系统参数如表1所示,对光源、材料以及接收面属性进行设置,并对所得模型进行光线追迹。

表1 准直系统参数

Table 1 Parameters of the collimating system

Parameter	value
Light source	1 mm×1 mm LED chip
Radiation pattern	Lambertian
Total light-source flux	100 lm
β	30°
Lens material	PMMA
Receiving distance	230 mm

随着LED的广泛应用,其芯片尺寸越来越小,仿真使用的1 mm×1 mm的面光源已被广泛应用。图8(a)、(b)分别为理想点光源与1 mm×1 mm面光源的准直效果图,其中对LED面光源经配光系统准直后的发散角为 $\pm 2.4^\circ$,仿真结果显示:基于理想点光源建立的自由曲面准直系统对1 mm×1 mm的LED面光源同样具有很好的准直效果。

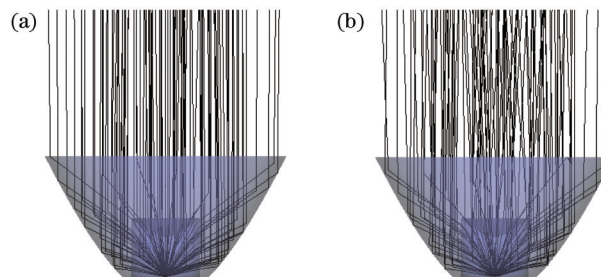


图8 (a)点光源和(b)LED面光源的光线追迹图

Fig.8 Ray trace for (a) point source and (b) LED light source

系统能量的损失主要来源于光线的偏离、菲涅耳损失以及准直镜组材料对能量的吸收等,其中光线偏离是系统能量损失的主要因素^[17]。如图9所示为接收面在距光源230 mm处形成的圆形光斑的能量分布,可以得出在半径为16 mm的圆形光斑内即接收角度为 $\pm 4^\circ$ 时,光源的能量利用率约为85.05%。

配光系统的结构、口径、材料、面光源尺寸等因素直接影响准直系统的性能,其中面光源尺寸的影响尤为突出。表2列出了不同尺寸的芯片在不同接收角度下的能量利用率。一般照明要求能量利用率在80%以

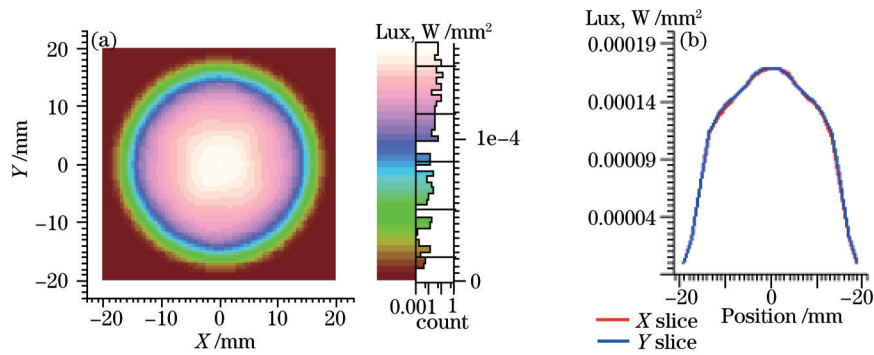


图9 目标面上的照度分布。(a) 光栅图; (b) 线图

Fig.9 Illuminance distribution on target plane. (a) Raster chart; (b) line chart

上,由表2可知对 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的面光源在接收角度为 $\pm 4^\circ$ 时此结构已完全满足要求。

表2 不同芯片尺寸、接收角度的能量利用率

Table 2 Optical efficiency for different chip sizes and receive angles

Chip size (mm×mm)	Efficiency under different receive angles			
	1°	2°	3°	4°
0.2×0.2	83.57	96.26	96.27	96.27
0.4×0.4	73.34	89.73	95.86	96.28
0.6×0.6	57.79	80.22	90.70	95.13
0.8×0.8	40.53	70.74	83.55	90.73
1×1	28.59	59.57	76.28	85.05
1.2×1.2	20.57	47.54	68.54	79.25
1.4×1.4	15.24	37.57	59.97	73.21
1.6×1.6	11.73	29.86	51.15	66.70
1.8×1.8	9.23	24.03	43.02	59.81
2×2	7.52	19.53	36.24	52.75

将表2中不同芯片尺寸在接收角度为 4° 时的仿真结果与参考文献[18]中表2接收角度为 4° 时的能量利用率进行对比。如图10所示,随着芯片尺寸的增大能量利用率都呈减小的趋势,针对相同接收角度,所建模型的能量利用率存在明显优势。

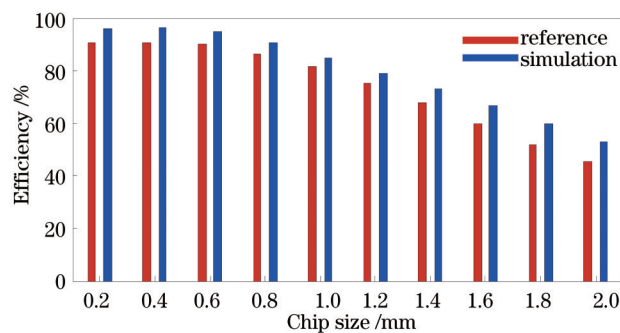


图10 不同芯片尺寸的能量利用率与参考值的对比

Fig.10 Efficiency of different chip size compared with the reference

参考文献[18]中需求解三个折射面与一个反射面的结构参数,其结构与准直系统结构相比体积更大、结构更加复杂。采用二次B样条插值方法拟合得到的曲线,是由许多小抛物线构成且两相邻抛物线之间为一阶连续的^[4],较文献中使用的三次多项式拟合更加逼近于同一特征多边形,且能够保持曲面的连续性,更加适用于自由曲面的设计应用。

5 结 论

针对荧光偏振免疫分析仪对光源的需求,通过理论分析给出了LED准直系统模型建立的详细过程并对

该模型进行了模拟仿真。仿真结果表明采用 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 面光源进行照明时,准直系统出射光的发散角为 $\pm 2.4^\circ$, 荧光偏振免疫分析仪接收面的能量利用率可达 85% 以上, 满足仪器照明需求。定量的给出了不同芯片尺寸在不同接收角度下的能量分布情况, 并将系统的准直性能与原有的参考值进行对比, 验证了理论的正确性, 分析了 B 样条插值的优势。与其他 LED 自由曲面设计相比具有设计过程简单、不需要进一步优化、准直性高等特点。

参考文献

- 1 Mi Tiejun. Fluorescence Polarization Immunoassays for Determination of Quinolones Residue in Animal-Origin Foods [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.
米铁军. 动物性食物中喹诺酮类药物残留的荧光偏振免疫分析研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
- 2 Tang Jianshe. Study on Fluorescence Polarization Immunoassay and Multi-Residue Elisa for Organophosphorus Pesticide [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
唐建设. 有机磷农药荧光偏振及多残留免疫分析研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- 3 Susan R Popelka, Dennis M Miller, James T Holen, *et al.*. Fluorescence polarization immunoassay II. analyzer for rapid, precise measurement of fluorescence polarization with use of disposable cuvettes[J]. Clin Chem, 1981, 27(7): 1198-1201.
- 4 Bao Zhicong. Research on Design of Freeform Surface Lens for LED Lighting System[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013: 24-36.
鲍志聪. 基于 LED 光源的自由曲面照明透镜的设计研究[D]. 北京: 清华大学, 2013: 24-36.
- 5 Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, *et al.*. Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for LED collimators[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922004.
张航, 梁雪, 严金华, 等. LED 准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922004.
- 6 Guangzhen Wang, Lili Wang, Fuli Li, *et al.*. Collimating lens for light-emitting-diode light source based on non-imaging optics[J]. Appl Opt, 2012, 51(11): 1654-1659.
- 7 Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222001.
荆雷, 刘华, 赵会富, 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222001.
- 8 E Chen, F H Yu. Design of an elliptic spot illumination system in LED-based color filter - liquid-crystal-on-silicon pico projectors for mobile embedded projection[J]. Appl Opt, 2012, 51(16): 3162-3170.
- 9 Luo Xiaoxia, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Automated optimization of free-form surface lens for collimation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1351-1355.
罗晓霞, 刘华, 卢振武, 等. 实现 LED 准直照明的优化设计[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1351-1355.
- 10 Yan Qiang, Gao Chunming, Sheng Yanmei, *et al.*. Optimization design of LED collimation lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 112203.
严强, 高椿明, 生艳梅, 等. LED 照明准直透镜结构优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 112203.
- 11 Zhao Huifu, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.*. Design of RIXR LED collimating system[J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(7): 1472-1479.
赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1472-1479.
- 12 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544.
丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540-544.
- 13 Hao Xiang, Zheng Zhenrong, Liu Xu, *et al.*. Freeform surface lens design for uniform illumination[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2008, 10(7): 075005.
- 14 Kai Wang, Sheng Liu, Fei Chen. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination[J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2009, 11(10): 105501.
- 15 Xin Di. Optical Design of Freeform Surface in LED Illumination Systems[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 50-60.
辛迪. 基于 LED 自由曲面照明光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院大学, 2014: 50-60.
- 16 Hu Chenghua, Shi Lingna, Xia Chuanhui, *et al.*. Optimal design of TIR lens for LED light Source[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(2): 184-187.
胡成华, 史玲娜, 夏川茴, 等. 基于 LED 光源的 TIR 透镜的优化设计[J]. 光电器件, 2012, 33(2): 184-187.
- 17 Jinjia Chen, Chintang Lin. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens[J]. Opt Eng, 2010, 49(9): 093001.
- 18 Jinjia Chen, Teyuan Wang, Kuanglung Huang, *et al.*. Freeform lens design for LED collimating illumination[J]. Optics Express, 2012, 10(20): 10984.