

## 激光与光电子学进展

## 基于负焦距透射结构的自由曲面准直透镜设计

刘亮志<sup>1</sup>, 郭亮<sup>1\*</sup>, 陈志涛<sup>2</sup>, 张志清<sup>2\*\*</sup>, 张庆茂<sup>1</sup>, 许毅钦<sup>2</sup><sup>1</sup>华南师范大学信息光电子科技学院广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006;<sup>2</sup>广东省科学院半导体研究所, 广东 广州 510651

**摘要** 为了有效提高半导体发光二极管(LED)光学系统的空间利用率,设计了一款基于负焦距透射结构的自由曲面准直透镜。该准直透镜分为透射准直和反射准直两部分,设计基于几何光学、斯涅耳定律以及能量守恒定律,通过使用Matlab软件编写算法迭代计算得到透镜的2D曲线数据,然后将2D曲线数据导入Solidworks软件旋转360°后得到准直透镜的3D模型,再导入光学建模软件Lighttools进行光线追迹,根据接收面上的光斑情况对准直透镜进行优化,优化后的准直模块经过模拟仿真,光能利用率为88.45%,光束角为 $\pm 2.23^\circ$ ,具有优越的准直性能,相比传统的单透射自由曲面准直透镜,采取负焦距透射结构设计的准直透镜体积同比减少63.13%,能更有效地实现对LED光线的调控并减小透镜的体积。

**关键词** 光学设计与制造; 准直光学设计; 负焦距结构; 自由曲面; 算法设计; 斯涅耳定律

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1722005

## Design of Collimating Lens with Freeform Surfaces Based on Negative Focal Length Transmission Structure

Liu Liangzhi<sup>1</sup>, Guo Liang<sup>1\*</sup>, Chen Zhitao<sup>2</sup>, Zhang Zhiqing<sup>2\*\*</sup>, Zhang Qingmao<sup>1</sup>, Xu Yiqin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Functional Materials and Devices, School of Information and Optoelectronic Science and Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, Guangdong, China;

<sup>2</sup>Institute of Semiconductors, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, Guangdong, China

**Abstract** To effectively improve the space usage of optical systems for the light-emitting diode (LED), a freeform surface optical lens with a negative focal length transmission structure was designed. The optical lens was divided into two parts, including the transmission collimating module and reflection collimating module. The collimating lens was designed using geometrical optics, Snell's law, and the law of energy conservation. The two-dimensional curve data of the freeform surface for the collimating module was obtained through iterative calculations with Matlab software, which was then imported into Solidwork software and rotated 360° around the central axis to obtain the three-dimensional solid model. Finally, the model was introduced into the optical simulation software, Lighttools, for light tracing and optimized according to the spot situated on the receiving surface. The optimized collimating lens was simulated with an optical energy utilization rate of 88.45% and a beam angle of  $\pm 2.23^\circ$ . The results show that using a negative focal length transmission structure design can effectively reduce the volume of the collimating lens by 63.13% and improve the ability to control LED beams compared with the conventional single transmission freeform surface collimating lens.

**Key words** optical design and fabrication; collimating optical design; negative focus structure; freeform surface; arithmetic design; Snell's law

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2021-12-31; 录用日期: 2022-01-05

**基金项目:** 国家自然科学基金(62005081)、教育部高等教育司项目(202002075025)、广东省重点领域研发计划项目(2020B090922006)、广东省基础与应用基础研究基金(2021A1515011932, 2020A1515110985)、广东省教育厅特色创新项目(2019KTSCX034)、广东省省级科技计划项目(2018B030323017)、广东省科学院专题三“千名博士(后)计划”引进专项(2021GDA-SYL-20210103069)、广州市科技计划(2019050001)、广州市科技计划项目(202002030165)、华南师范大学青年基金(19KJ13)

通信作者: \*guoliangchn@163.com; \*\*zzqing1984@126.com

# 1 引言

作为第四代光源的半导体发光二极管(LED)具有十分广泛的应用范围,因其与传统光源相比具有响应速度快、光源体积小、能量损耗低、光电转换率高等优势<sup>[1-3]</sup>。但由于其具有大角度出射的朗伯光源特性,直接使用很难满足照明需求,为了提高LED的光学效率和发光性能,需要对LED发出的光线重新进行分配,以满足特定的应用需求,上述过程称为二次光学设计<sup>[4]</sup>。自由曲面作为二次光学设计中常用的一种曲面类型,能够重新定向光束以产生需要的辐射强度或辐照度分布,在不降低照明系统光学性能的前提下,最大限度地简化了光学系统结构和增加了设计自由度,因其具备上述诸多优点而备受设计者们的青睐<sup>[5-7]</sup>。

在众多的光学元件设计中,LED准直透镜在探射灯、汽车前照灯、建筑照明甚至光刻领域都有广泛的应用潜力,要产生小光束角和中心高发光强度的光束,就需要使用紧凑型的准直系统,且准直出射的光线有利于光学系统后续的光线调控,可以看作是开发更复杂光学系统的基础系统。因此实现高效准直的光学透镜设计是目前的一个研究热点<sup>[8-9]</sup>。例如Zeng等<sup>[10]</sup>设计了两个分离的透镜分别控制光源的均匀照度和光线的准直出射,目标照明区域实现了大于90%的均匀度;Wang等<sup>[11]</sup>通过求解微分方程设计的一款包含4个自由曲面的准直均匀透镜,实现了93%的均匀度以及光束的发散半角控制在 $\pm 2^\circ$ 以内;Kumar等<sup>[12]</sup>基于椭圆的几何特性设计了一款准直透镜,避免了求解复杂的微分方程,光束的发散半角控制在 $\pm 2^\circ$ 以内;Zhu等<sup>[13]</sup>基于边缘射线原理设计了一种双自由曲面的超紧凑旋转对称透镜,目标照明区域实现了大于86%的均匀度;Luo等<sup>[14]</sup>从几何光学出发设计了一款宽高比为0.181的超紧凑准直透镜,目标照明区域实现了88.5%的光学效率;曾翌等<sup>[15]</sup>采取边缘光线理论和斯涅耳定律设计双自由透射曲面,将透镜的横向尺寸和厚度分别减少10.5%和2.95%。

然而,目前光学透镜设计者们所设计的大多数准直透镜都是一体化、体积相对较大、功能单一的光学透镜<sup>[16-17]</sup>,随着照明系统便携化的发展趋势,对准直透镜的结构和光学效果也提出了更高的要求,结构紧凑化已成为一项关键的技术要求<sup>[18]</sup>。为了进一步实现光学系统的紧凑化,本文设计了一款基于负焦距透射结构的自由曲面准直透镜,给出了该准直透镜设计的理念及详细算法,并对设计出来的透镜模型进行光学模拟仿真并根据仿真结果进行优化改进。相比传统的单透射自由曲面准直透镜,采取负焦距透射结构设计的准直透镜能更有效地实现对LED光线的调控并减小透镜的体积。

## 2 准直透镜的算法设计

### 2.1 设计原理

准直透镜的构成设计如图1所示,定义所使用的

LED光源发散半角为 $(\gamma + \beta)$ ,该准直透镜由曲线1~6以及直线1~5所构成的2D截面绕中心光轴旋转一周可得,所述曲线均是自由曲线,所述直线均只起连接自由曲线作用,没有任何光学作用。该准直透镜分为透射准直和反射准直两部分,透射准直部分由曲线1、曲线2和曲线3共同组成,作用是准直光源 $\beta$ 角度内的光线;反射准直部分由曲线4和曲线5共同组成,作用是准直光源 $\gamma$ 角度内的光线;曲线6是透镜的功能曲面,既可以是一个自由曲面也可以是附加的光学系统,取决于实际的光学需求而灵活变换。透射准直部分和反射准直部分共同将LED发出的光线准直出射到目标区域,与传统全内反射结构(TIR)准直透镜不同的是,曲线1和曲线2共同组成一个负焦距透镜,用于调控LED光源发出的光线从而整形光源,最终实现增大透射部分自由曲线的设计角度 $\beta$ ,从而减小反射部分自由曲线的设计角度 $\gamma$ ,达到减小透镜体积使光学系统更紧凑的目的。本文分别设计了透镜的折射准直和反射准直两部分的算法,并设定空气和透镜材料的光学折射率分别为 $I_0 = 1$ 和 $I$ 。

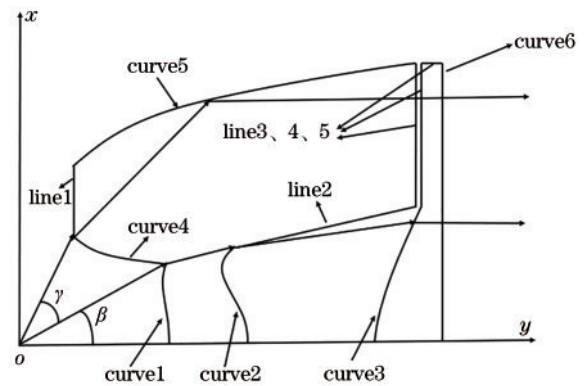


图1 准直透镜的组成结构

Fig. 1 Composition diagram of collimating lens

### 2.2 负焦距透射部分算法设计

图2所表示的是负焦距透射结构的光路设计原理,将LED光源放置在直角坐标系的原点 $S$ 处,入射光线 $\overrightarrow{SA}$ 经过曲面 $S_1$ 折射后形成透射光线 $\overrightarrow{AB}$ ,然后透射光线 $\overrightarrow{AB}$ 再通过曲面 $S_2$ 折射形成出射光线 $\overrightarrow{BC}$ ,出射光线 $\overrightarrow{BC}$ 经过曲面 $S_3$ 折射形成光线 $\overrightarrow{CR}$ 平行光轴出射。定义点 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 的法向量分别为 $\vec{N}_A$ 、 $\vec{N}_B$ 、 $\vec{N}_C$ ,切向量分别为 $\vec{T}_A$ 、 $\vec{T}_B$ 、 $\vec{T}_C$ ,根据斯涅耳定律可得以下关系:

$$I_0 \cdot \frac{N_1}{|N_1|} \times N_A = I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \times N_A, \quad (1)$$

$$I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \times N_B = I_0 \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \times N_B, \quad (2)$$

$$I_0 \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \times N_C = I \cdot \frac{N_4}{|N_4|} \times N_C, \quad (3)$$

式中: $N_1 = \overrightarrow{SA}$ ;  $N_2 = \overrightarrow{AB}$ ;  $N_3 = \overrightarrow{BC}$ ;  $N_4 = \overrightarrow{CR}$ 。化简上式可得

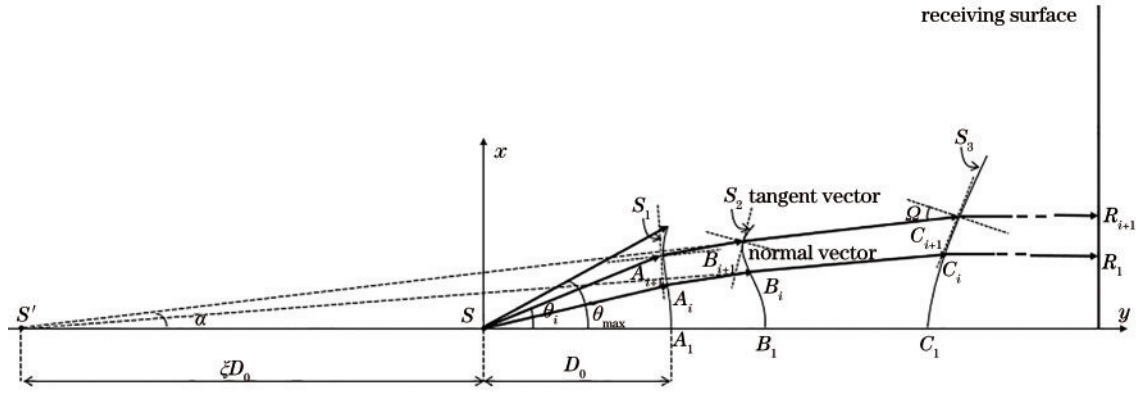


图 2 负焦距透射结构的算法设计原理

Fig. 2 Arithmetic design principle of negative focal distance transmission structure

$$I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} - \frac{N_1}{|N_1|} = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_2}{|N_2|} \cdot \frac{N_1}{|N_1|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_A, \quad (4)$$

$$I \cdot \frac{N_4}{|N_4|} - \frac{N_3}{|N_3|} = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_4}{|N_4|} \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_C, \quad (6)$$

$$\frac{N_3}{|N_3|} - I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_3}{|N_3|} \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_B, \quad (5)$$

定义点 A、B、C 和 R 的坐标为  $(x_a, y_a)$ 、 $(x_b, y_b)$ 、 $(x_c, y_c)$  和  $(x_r, y_r)$ 。根据式(4)~(6), 点 A、B、C 的法向量可以表示为

$$N_A = \left( \frac{I \cdot \frac{x_b - x_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} - \frac{x_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}}}{R_1}, \frac{I \cdot \frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} - \frac{y_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}}}{R_1} \right), \quad (7)$$

$$N_B = (X_b, Y_b), \quad (8)$$

$$X_b = \frac{\frac{x_c - x_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}} - I \cdot \frac{x_b - x_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}}{R_2}, \quad (9)$$

$$Y_b = \frac{\frac{y_c - y_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}} - I \cdot \frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}}{R_2}, \quad (10)$$

$$N_C = \left( \frac{-\frac{x_c - x_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}}{R_3}, \frac{I - \frac{y_c - y_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}}{R_3} \right), \quad (11)$$

其中

$$R_1 = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_2}{|N_2|} \cdot \frac{N_1}{|N_1|} \right) \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$R_2 = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_3}{|N_3|} \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \right) \right]^{1/2}, \quad (13)$$

$$R_3 = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_4}{|N_4|} \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \right) \right]^{1/2}. \quad (14)$$

综上可得到点 A、B、C 的切线斜率的表达式为

$$k_A = \left( \frac{\frac{x_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}} - I \cdot \frac{x_b - x_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}}{I \cdot \frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} - \frac{y_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}}} \right), \quad (15)$$

$$k_B = \left( \frac{I \cdot \frac{x_b - x_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} - \frac{x_c - x_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}}{\frac{y_c - y_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}} - I \cdot \frac{y_b - y_a}{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}} \right), \quad (16)$$

$$k_C = \left( \frac{\frac{x_c - x_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}}{I - \frac{y_c - y_b}{\sqrt{(x_c - x_b)^2 + (y_c - y_b)^2}}} \right). \quad (17)$$

可根据图 2 推导透射部分自由曲线的坐标迭代关系式。取自由曲线  $S_1, S_2, S_3$  以及光学接收面上任意相邻两点, 设这两个相邻点分别为  $A_i, A_{i+1}, B_i, B_{i+1}, C_i, C_{i+1}, R_i, R_{i+1}$ , 令其坐标为  $(x_{ai}, y_{ai}), (x_{a(i+1)}, y_{a(i+1)}), (x_{bi}, y_{bi}), (x_{b(i+1)}, y_{b(i+1)}), (x_{ci}, y_{ci}), (x_{c(i+1)}, y_{c(i+1)}), (x_{ri}, y_{ri}), (x_{r(i+1)}, y_{r(i+1)})$ ,  $\theta_i$  为  $\overrightarrow{SA_i}$  与光轴  $z$  轴的夹角,  $\theta_{\max}$  为透射曲线  $S_1$  最大的入射角, 令  $\Delta\theta$  为  $\overrightarrow{SA_i}$  与  $\overrightarrow{SA_{i+1}}$  之间的夹角。根据式(15)~(17)可分别得到过点  $A_i, B_i, C_i$  的切线方程为

$$y - y_{ai} = k_{ai}(x - x_{ai}), \quad (18)$$

$$y - y_{bi} = k_{bi}(x - x_{bi}), \quad (19)$$

$$y - y_{ci} = k_{ci}(x - x_{ci}), \quad (20)$$

式中,  $A_i, B_i, C_i$  的切线斜率分别为  $k_{ai}, k_{bi}, k_{ci}$ 。当  $\Delta\theta$  取值极小时,  $A_{i+1}$  处于  $A_i$  的法向切线上,  $A_{i+1}$  坐标的表达式可通过联立  $SA_{i+1}$  的直线方程与式(18)得到:

$$x_{a(i+1)} = \frac{y_{ai} - k_{ai} \cdot x_{ai}}{\frac{1}{\tan(\theta_{i+1} + \theta_1)} - k_{ai}}, \quad (21)$$

$$y_{a(i+1)} = \frac{x_{a(i+1)}}{\tan(\theta_{i+1} + \theta_1)}. \quad (22)$$

由于自由曲面  $S_1, S_2$  的作用是将点源  $S$  发散出来的光线折射汇聚, 使得最终出射光线看起来像是来自一个新的假想光源  $S'$ , 设假想光源坐标为  $S'(x_h, y_h)$ , 几何关系如图 3 所示:

$$\frac{y_{fi} - y_h}{x_{fi} - x_h} = \frac{y_{bi} - y_h}{x_{bi} - x_h}, \quad (23)$$

$B_{i+1}$  坐标的表达式可通过联立  $SB_{i+1}$  的直线方程与式(23)得到:

$$x_{b(i+1)} = \frac{y_{bi} - y_h - k_{bi} \cdot x_{bi} + x_h \cdot \frac{y_{f(i+1)} - y_h}{x_{f(i+1)} - x_h}}{\frac{y_{f(i+1)} - y_h}{x_{f(i+1)} - x_h} - k_{bi}}, \quad (24)$$

$$y_{b(i+1)} = k_{bi} \cdot (x_{b(i+1)} - x_{bi}) + y_{bi}, \quad (25)$$

根据能量守恒定律可得

$$\frac{\int_0^{\theta_i} \int_0^{2\pi} i_0 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_0^{\theta_{i+1}} \int_0^{2\pi} i_0 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi} = \frac{\pi \cdot F_{i+1}^2}{\pi \cdot F_i^2}, \quad (26)$$

式中:  $\varphi$  为经度方向角;  $\theta$  为纬度方向角;  $i_0$  为光源在垂直方向上的发光强度;  $F_{i+1}$  坐标的表达式可通过联立  $SF_{i+1}$  的直线方程与式(26)得到:

$$x_{f(i+1)} = \sqrt{\frac{(\cos \theta_{i+1}^2 - \cos \theta_i^2) \cdot \frac{\pi}{2}}{\pi \cdot E_0} + x_{fi}^2}, \quad (27)$$

$$y_{f(i+1)} = y_{fi}, \quad (28)$$

式中,  $E_0$  为接收面的均匀照度值, 可通过总光通量与接收平面的面积求得。

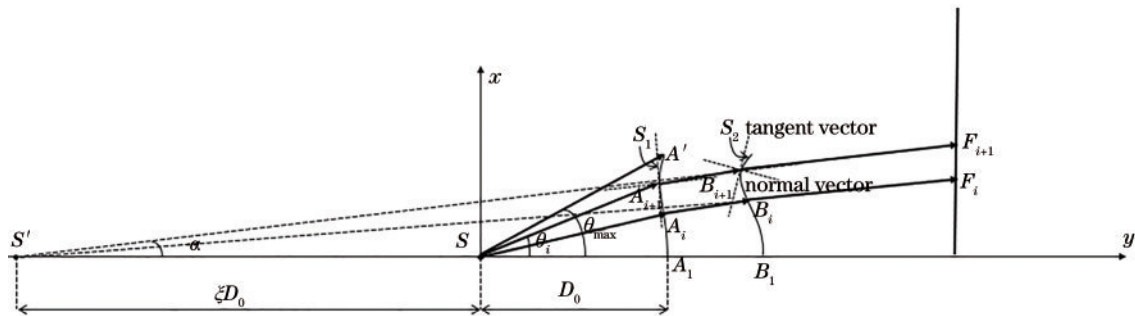


图 3 假想光源的算法设计原理

Fig. 3 Arithmetic design principle of virtual light source

自由曲面  $S_3$  的作用是将假想光源  $S'$  发出的光线准直出射, 即通过曲面  $S_3$  后出射光线的单位向量平行于  $y$  轴正方向, 因此  $C_{i+1}$  坐标的表达式可联立斯涅耳定律

的矢量表达式(29)与  $SC_{i+1}$  的直线方程式(20)得到:

$$n_2 \vec{O} - n_1 \vec{I} = \vec{N} \cdot \left[ n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 (\vec{O} \cdot \vec{I}) \right]^{1/2}, \quad (29)$$



$$x_{c(i+1)} = \frac{y_{ci} - k_{ci} \cdot x_{ci}}{\frac{1}{\tan \theta_i} - k_{ci}}, \quad (30)$$

$$y_{c(i+1)} = \frac{x_{c(i+1)}}{\tan \theta_i}, \quad (31)$$

式(29)中:  $n_2$  为出射光所处介质折射率;  $n_1$  为入射光所处介质折射率。

### 2.3 反射部分算法设计

图 4 所表示的是反射结构的光路设计原理。将

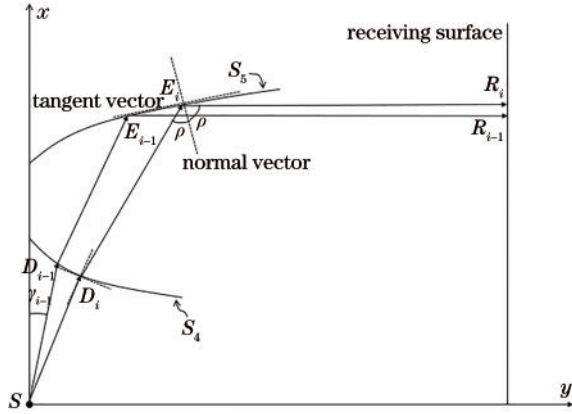


图 4 反射结构的算法设计原理

Fig. 4 Arithmetic design principle of reflection structure

LED 光源放置在直角坐标系的原点  $S$  处, 光线  $\overrightarrow{SD}$  与  $x$  轴的夹角为  $\gamma$ , LED 发出的光线先经过自由曲线  $S_4$  上的  $D$  点后折射到自由曲线  $S_5$  的  $E$  点, 然后在  $E$  点发生全反射, 最后光线平行于光轴出射并与光学接收平面相交于  $R$  点。定义  $D$ 、 $E$  两点的法向量分别为  $\overrightarrow{N}_D$ 、 $\overrightarrow{N}_E$ , 切向量分别为  $\overrightarrow{T}_D$ 、 $\overrightarrow{T}_E$ , 根据斯涅耳定律可得以下关系:

$$I_0 \cdot \frac{N_5}{|N_5|} \times N_D = I \cdot \frac{N_6}{|N_6|} \times N_D, \quad (32)$$

$$I \cdot \frac{N_6}{|N_6|} \times N_E = I \cdot \frac{N_7}{|N_7|} \times N_E, \quad (33)$$

式中:  $N_5 = \overrightarrow{SD}$ ;  $N_6 = \overrightarrow{DE}$ ;  $N_7 = \overrightarrow{ER}$ 。化简上式可得

$$I \cdot \frac{N_6}{|N_6|} - \frac{N_5}{|N_5|} = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_6}{|N_6|} \cdot \frac{N_5}{|N_5|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_D, \quad (34)$$

$$I \cdot \frac{N_7}{|N_7|} - I \cdot \frac{N_6}{|N_6|} = \left[ 2I^2 - 2I^2 \left( \frac{N_7}{|N_7|} \cdot \frac{N_6}{|N_6|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_E. \quad (35)$$

定义点  $D$ 、 $E$ 、 $R$  的坐标分别为  $(x_d, y_d)$ 、 $(x_e, y_e)$ 、 $(x_r, y_r)$ , 根据式(32)~(35), 点  $D$ 、 $E$  的法向量可以表示为

$$N_D = \left( \frac{I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - \frac{x_e}{\sqrt{x_e^2 + y_d^2}}}{R_4}, \frac{I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - \frac{y_e}{\sqrt{x_e^2 + y_d^2}}}{R_4} \right), \quad (36)$$

$$N_E = \left( \frac{-I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}}{R_5}, I - \frac{I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}}{R_5} \right), \quad (37)$$

其中

$$R_4 = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_6}{|N_6|} \cdot \frac{N_5}{|N_5|} \right) \right]^{1/2}, \quad (38)$$

$$R_5 = \left[ 2I^2 - 2I^2 \left( \frac{N_7}{|N_7|} \cdot \frac{N_6}{|N_6|} \right) \right]^{1/2}, \quad (39)$$

同理可得点  $D$ 、 $E$  的法向切线斜率, 表达式为

$$k_D = \left( \frac{-I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} + \frac{x_e}{\sqrt{x_e^2 + y_d^2}}}{I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - \frac{y_e}{\sqrt{x_e^2 + y_d^2}}} \right), \quad (40)$$

$$k_E = \left( \frac{I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}}{R_5 \cdot I - I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}} \right), \quad (41)$$

由式(41)得  $E_i$  点斜率  $k_E$ , 设光线  $\overrightarrow{DE}$  与过点  $E_i$  法线的夹角为  $\rho$ , 由图 4 的几何关系可知

$$\rho = \frac{\pi}{2} - \arctan(k_E), \quad (42)$$

若满足条件:  $\rho \geq \arcsin(\frac{I_0}{I})$ , 则入射光线  $\overrightarrow{DE}$  在曲面  $S_5$  上发生全反射, 代入空气和透镜材料的光学折射率分别为  $I_0 = 1$  和  $I = 1.494$ , 可得全反射临界角  $\lambda = 42.01^\circ$ , 结合斯涅耳定律设计曲面  $S_4$  使所有入射光

线  $\overrightarrow{DE}$  的入射角  $\rho$  大于等于临界角  $\lambda$ , 即可在曲面  $S_5$  实现全反射。图 5 是光线  $\overrightarrow{DE}$  在曲面  $S_5$  各位置的入射角数据, 由图 5 可以看出, 曲面  $S_5$  上所有的入射角均大于临界角, 即所有入射光线在反射部分均发生了全反射的准直出射。

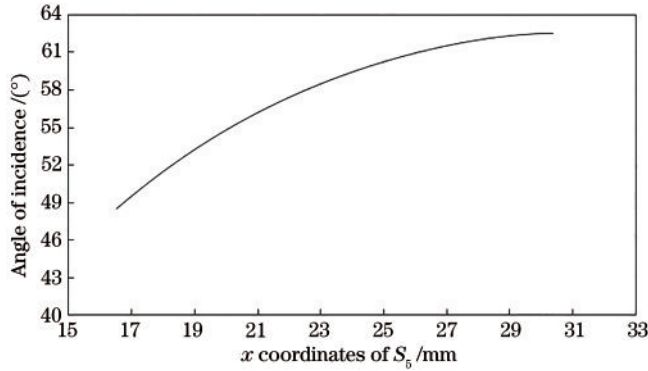


图 5 曲面  $S_5$  各位置的入射角  
Fig. 5 Angles of incidence on  $S_5$

$D_{i+1}$  与  $E_{i+1}$  坐标表达式可通过依次联立  $D$ 、 $E$  的斜率表达式(41)和式(42)与能量守恒定律以及斯涅耳定律的矢量表达式(29)得到, 即:

$$x_{d(i+1)} = \frac{y_{di} - k_{di} \cdot x_{di}}{\tan \gamma_{i+1} - k_{di}}, \quad (43)$$

$$y_{d(i+1)} = \tan \gamma_{i+1} \cdot x_{d(i+1)}, \quad (44)$$

$$x_{e(i+1)} = x_{ei} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos 2\gamma_{i+1}}{1 - \cos 2\gamma_i}}, \quad (45)$$

$$y_{e(i+1)} = k_{ei} \cdot (x_{e(i+1)} - x_{ei}) + y_{ei}. \quad (46)$$

### 2.4 准直透镜模型的建立

将上述各准直部分的算法使用 Matlab 编程计算自由曲线  $S_1$ - $S_5$  的离散数据点, 为了保证各自由曲线足够平滑且各曲线之间衔接自然, 需要通过反复多次调试来设置每条曲线比较合适的迭代次数和初值, 最终设定各曲线的初始坐标为:  $A_1(0, 7.703)$ ;  $B_1(0, 11)$ ;  $C_1(0, 26.750)$ ;  $D_1(8.312, 3.708)$ ;  $E_1(16.500, 3.708)$ 。以上坐标单位均为 mm, 初始角  $\theta$ 、 $\gamma$  均设置为  $0.01^\circ$ , 步长为  $0.01^\circ$ , 平滑且连续的自由曲线是通过将 Matlab 迭代计算的离散点数据导入 3D 建模软件 Solidworks 中拟合得到, 并在各端点间利用直线连接起来以形成闭合曲线, 然后将得到的 2D 截面绕光轴旋转  $360^\circ$  得到准直透镜的初始模型。准直透镜的 2D 截面拟合曲线以及准直透镜的 3D 初始模型如图 6 所示。

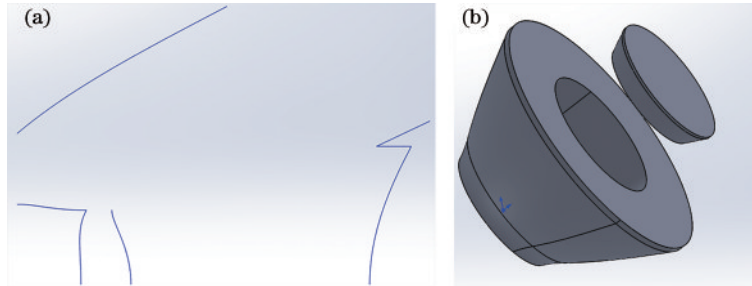


图 6 准直透镜。(a)离散点拟合曲线;(b)3D 实体模型  
Fig. 6 Collimating lens. (a) Discrete point matched curve; (b) 3D solid model

### 3 负焦距结构性能分析

如图 7 所示, 令  $\alpha$  表示单个折射曲面  $S_3$  所折射光线与光轴的角度,  $\Omega$  表示折射光线在折射曲面  $S_3$  各点处的入射角度, 当入射角  $\Omega$  大于临界角  $\lambda$  时会发生全反射, 此时折射曲面  $S_3$  失去折射能力, 由几何光学分析可知  $\alpha$  与  $\Omega$  的关系为

$$\Omega = \arctan\left(\frac{\sin \alpha}{\cos \alpha - 0.67}\right). \quad (47)$$

图 7 表示的是  $\alpha$  和  $\Omega$  的数值关系, 可以看出单折射曲面  $S_3$  的折射角度范围为  $\pm 15.38^\circ$ , 超过这个范围的光线将由反射准直模块实现反射准直出射。

如图 3 所示, 设曲面  $S_1$  上端点坐标为  $A'(x_{s1}, y_{s1})$ , 假想光源坐标为  $S(x_h, y_h)$ , 则有

$$\theta_{\max} = \arctan\left(\frac{x_{s1}}{y_{s1}}\right), \quad (48)$$

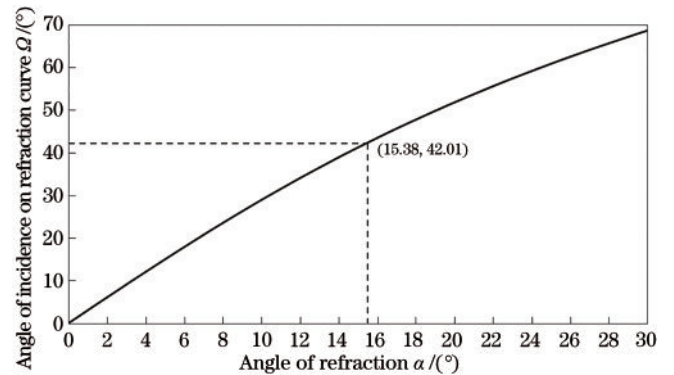


图 7 折射角与入射角的数值关系  
Fig. 7 Numerical relationship between refraction angle and incidence angle

$$\alpha_{\max} = \arctan\left(\frac{x_{s1}}{y_{s1} - y_h}\right), \quad (49)$$

式中:  $\theta_{\max}$  表示负焦距折射准直模块所能折射的最大

角度;  $\alpha_{\max}$  表示单个折射曲面  $S_3$  所能折射的最大角度, 令  $K = \frac{\theta_{\max}}{\alpha_{\max}}$ , 这表示通过负焦距结构, 折射准直模块的折射能力提升了  $K$  倍, 设光源的发光半角为  $\rho$ , 若采取常规的单折射曲面透射结构, 则  $(\rho - \alpha_{\max})$  范围内的光线需要通过反射准直出射; 若采取负焦距透射结构, 则需要通过反射准直出射的光线范围缩小为  $(\rho - \theta_{\max})$ , 由图 1 可以看出, 准直透镜的外形体积主要由反射准直曲线  $S_5$  决定。图 8 是在不同反射准直角度范围情况下反射模块的体积变化趋势, 经过多项式拟合可得到

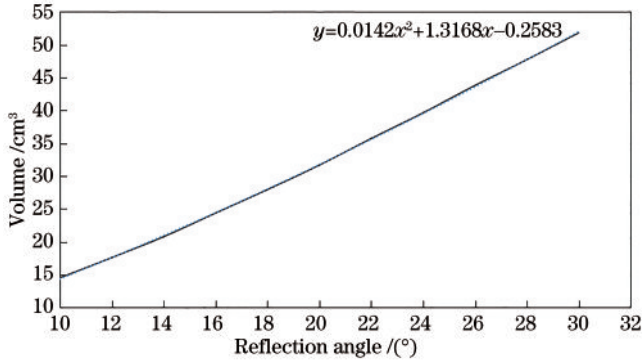


图 8 不同反射准直角度范围下的体积  
Fig. 8 Volumes of different range of reflection collimating angles

透镜体积的变化趋势方程式为  $y = 0.0142x^2 + 1.3168x - 0.2583$ , 式中  $x$  表示反射准直角度的范围,  $y$  表示反射模块的体积, 由此式可计算得到单折射曲面透射结构与负焦距透射结构所引起的准直透镜体积差为:  $\Delta = [0.0142(\theta_{\max}^2 - \alpha_{\max}^2) + 1.3168(\theta_{\max} - \alpha_{\max})] \text{cm}^3$ 。在本文的设计中, 单折射曲面准直透镜的折射角度为  $13.62^\circ$ , 通过负焦距结构整形光源后, 折射准直模块的折射角度增加至  $31.4^\circ$ , 对应透镜的体积相差  $34.7785 \text{cm}^3$ , 这表示使用负焦距透射结构后, 透镜体积减少了  $63.13\%$ 。综上所述, 负焦距透射结构能够有效提高折射模块的折射能力以及减小准直透镜的体积。

#### 4 准直透镜结构模拟仿真及优化分析

利用光学仿真软件 Lighttools 对透镜准直模块的 3D 模型进行光线追迹, 将透镜的材料设置为具有高透光率的塑料材料甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 中, 这种材料的光学折射率为 1.494。设置光源的尺寸为  $2 \text{mm} \times 2 \text{mm}$ , 且设置为朗伯发光特性, 设置光源发光角度为  $120^\circ$ , 发光功率  $3 \text{W}$ , 设置光源发出的总光线数为 200 万条, 光学接收平面的尺寸设置为  $2 \text{m} \times 2 \text{m}$ , 放置在距离光源  $10 \text{m}$  的位置, 图 9 为准直模块进行蒙特卡罗光线追迹的结果。

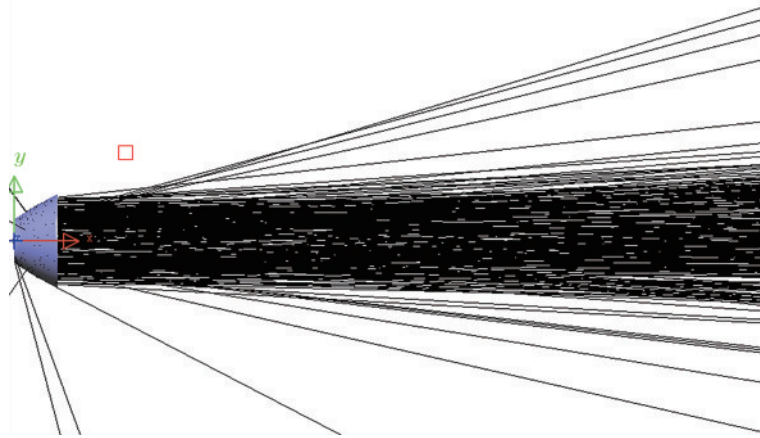


图 9 准直模块光线追迹结果  
Fig. 9 Ray tracing results of collimating module

由图中所示结果分析可知, LED 光源发出的绝大部分光线经过准直模块后平行光轴出射, 实现了透镜准直模块的预期功能。接收平面上的光斑如图 10 所示。配光曲线如图 11 所示。

从图 10~11 可知光能利用率为  $76.42\%$ , 光束角为  $\pm 3.08^\circ$ 。但从光斑图可以看出光斑融合效果并不是十分理想, 透射部分和反射部分的光斑过渡不是十分自然, 造成这个现象的主要原因是在用 Matlab 软件计算出来的自由曲面离散点数据拟合出的自由曲面来构造自由透镜时, 计算自由曲面离散点的迭代方程数量对自由曲面有一定的影响, 过少的迭代方程会

导致自由曲线精度不够, 过多的迭代方程会极大地增大求解自由曲线的难度甚至导致求解结果不收敛, 要在求解可行性与求解精度上面找到一个平衡, 最终得到的自由曲线与理想计算中的自由曲线会存在细微误差, 即计算自由曲线上与理想自由曲线的对应点的法线矢量会有一些的偏差, 最终导致自由曲面的面型产生偏差。所以要对最终迭代计算出来的自由曲线进行优化以减小面型偏差, 从而解决光斑过渡不自然的问题。具体的优化方法采用文献 [19] 的优化方法, 最终实现光能利用率为  $88.45\%$ , 光束角为  $\pm 2.23^\circ$ , 从图 12~13 可以看出优化后光斑过渡自然, 呈现出

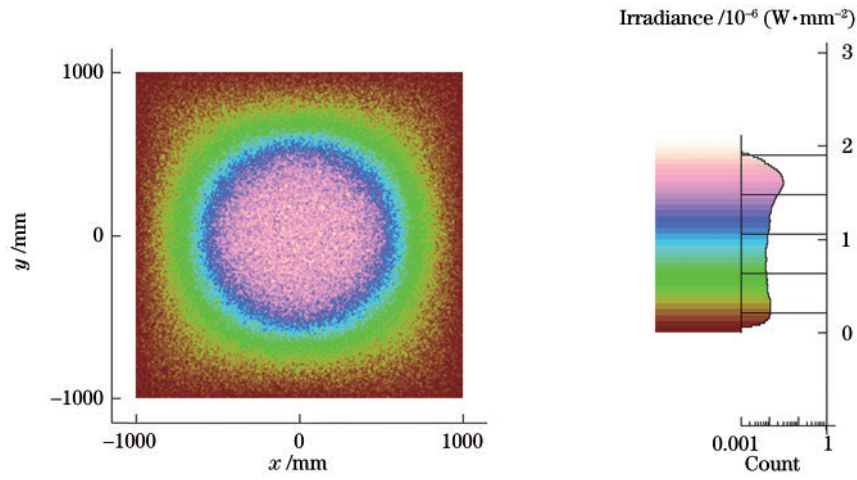


图 10 准直模块优化前光斑

Fig. 10 Light spot before collimating module optimization

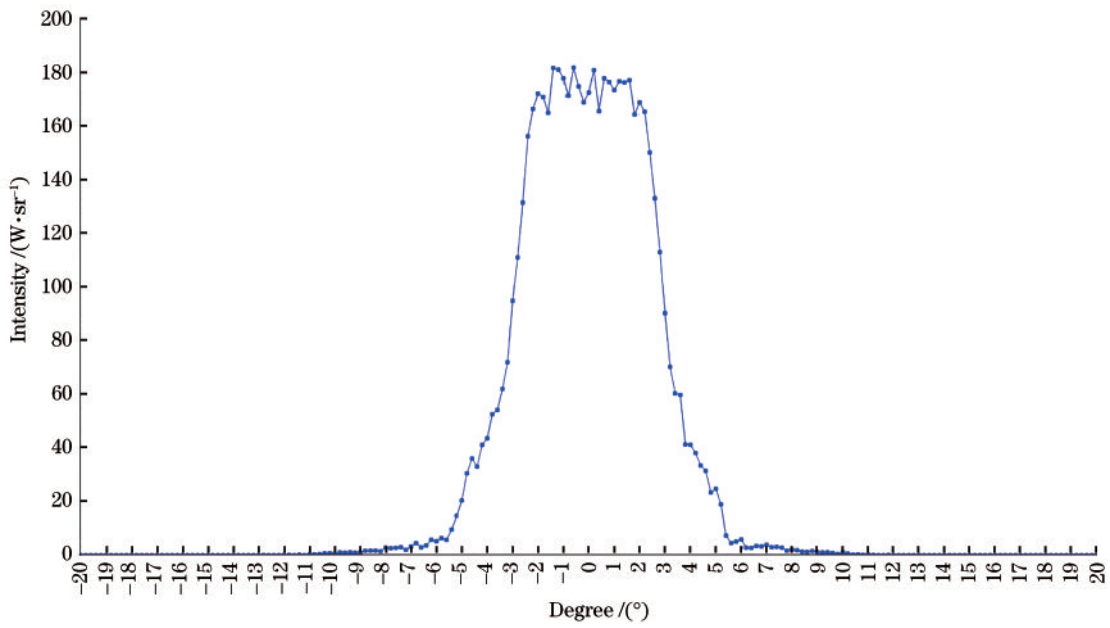


图 11 准直模块优化前的配光曲线

Fig. 11 Photometric data before collimating module optimization

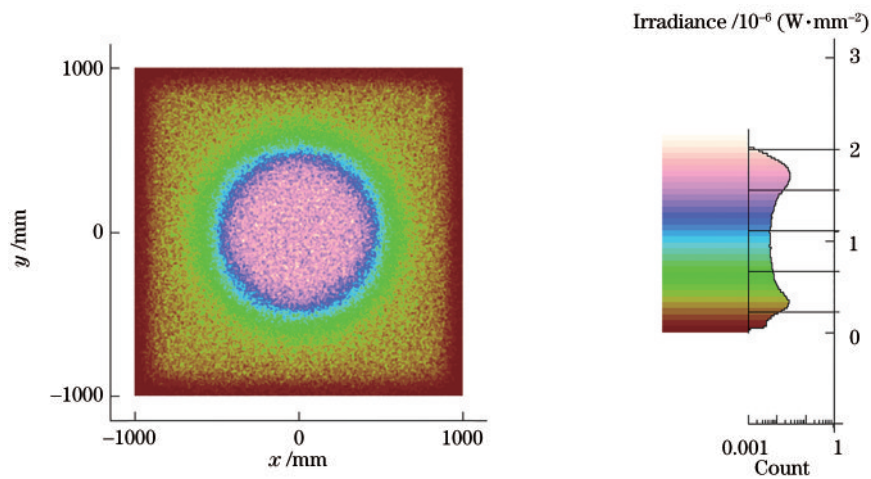


图 12 准直模块优化后光斑图

Fig. 12 Light spot after collimating module optimization



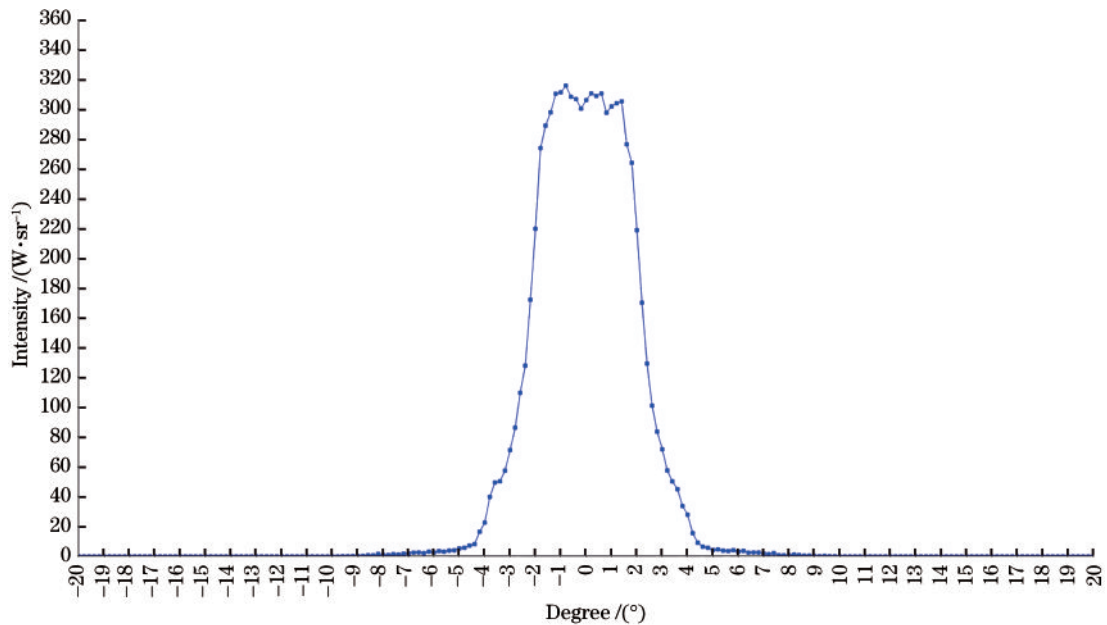


图 13 准直模块优化后的配光曲线

Fig. 13 Photometric data after collimating module optimization

较好的光斑融合及准直效果,提高了出光效率。

## 5 结 论

从非成像光学的理论出发,结合斯涅耳定律和能量守恒定律设计了一款针对LED光源的负焦距透射结构自由曲面准直光学透镜,最终获得光束角 $\pm 2.23^\circ$ ,光能利用率88.45%的准直透镜,该透镜优越的准直性能有利于光学系统后续的光线调控设计,与传统的单折射曲面TIR准直透镜相比,该负焦距透射结构自由曲面准直透镜具有更高的设计自由度,可以更好地调控光源小角度的光线且体积同比减少63.13%,易于实现光学系统紧凑化设计需求,对LED光学系统的设计具有理论指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] 王恺. 大功率LED封装与应用的自由曲面光学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.  
Wang K. Freeform optics for high power LED packages and applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [2] 韩敏. 大尺寸LED光源准直透镜的设计与应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.  
Han M. Design and application of collimating lens for large-size LED source[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [3] Zhan Q J, Liu X Q, Hou Z H, et al. Design of TIR collimating lens for ordinary differential equation of extended light source[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10460: 104601T.
- [4] 孟祥翔, 刘伟奇, 冯睿, 等. 双自由曲面LED均匀照明准直透镜设计[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 0822003.  
Meng X X, Liu W Q, Feng R, et al. Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(8): 0822003.
- [5] Wu R M, Chang S Q, Ding Z H, et al. Designing two freeform surfaces with Monge-Ampère equation method for point-like sources[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10693: 1069306.
- [6] 刘展宇, 王沛沛, 金志樑, 等. 用于LED集鱼灯稳定照明的自由曲面透镜设计[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0522003.  
Liu Z Y, Wang P P, Jin Z L, et al. Free-form lens design for LED fishing lamp with stable illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0522003.
- [7] 樊润东, 赵会富, 曾翌, 等. 基于双高斯结构与自由曲面照明的小畸变投影系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2322001.  
Fan R D, Zhao H F, Zeng Y, et al. Design of small distortion projection system based on double Gaussian structure and freeform surface illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2322001.
- [8] Zhao H F. Research of TIR LED collimation system based on freeform[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10255: 102550T.
- [9] Mao X L, Li J P, Wang F B, et al. Fast design method of smooth freeform lens with an arbitrary aperture for collimated beam shaping[J]. Applied Optics, 2019, 58(10): 2512-2521.
- [10] Zeng J, Li X, Ge P. Design of LED collimator for uniform illumination using two freeform lenses[J]. Optica Applicata, 2018, 48(3): 413-420.
- [11] Wang Y, Zhang Y, Chen Y F. Design of LED Collimating lens for uniform illumination with freeform surface[C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), August 12-15, 2020, Guangzhou, China. New York: IEEE Press, 2020: 20015561.

- [12] Kumar H, Velu R, Balasubramanian E. A novel freeform lens design for collimating UV light emitted from an LED with large divergent angle[J]. *Optik*, 2019, 181: 1039-1048.
- [13] Zhu Z M, Xu X, Peng B, et al. Modeling and design of diffuse transmissive free-form surface based on LED collimation effect[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 119: 105628.
- [14] Luo T, Wang G. Compact collimators designed with point approximation for light-emitting diodes[J]. *Lighting Research & Technology*, 2018, 50(2): 303-315.
- [15] 曾翌, 赵会富, 段文举. 基于双自由曲面高距高比照度均匀的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(24): 2422001.  
Zeng Y, Zhao H F, Duan W J. Design of optical system with illumination uniform and high distance-height ratio based on double freeform-surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2422001.
- [16] 赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0422001.  
Zhao H, Li C G, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0422001.
- [17] Chen X D, Lin J P, Liu Z J, et al. Aspheric surface lens for LED collimating illumination with low Fresnel loss[J]. *Optical Review*, 2017, 24(1): 62-71.
- [18] 胡甜甜, 曾春梅, 芮丛珊, 等. 用于 LED 均匀照明的自由曲面菲涅耳 TIR 透镜光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(2): 20200183.  
Hu T T, Zeng C M, Rui C S, et al. Optical design of freeform Fresnel TIR lens for LED uniform illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200183.
- [19] 周彦辰, 郭亮, 陈志涛, 等. 基于全内反射结构的多自由曲面准直透镜设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0422003.  
Zhou Y C, Guo L, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with multiple freeform surfaces based on total internal reflection structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0422003.