

## 基于全内反射结构的多自由曲面准直透镜设计

周彦辰<sup>1,2</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** 为了有效地收集半导体发光二极管大范围的出射光以实现光能的高效利用,设计一款基于全内反射结构的多个自由曲面准直透镜,该透镜的初始结构是根据 Snell 定律和能量守恒定律等光学原理的算法设计而成。将该透镜的初始结构导入 Creo 软件中并进行 360° 旋转以得到 3D 实体模型,将其转入 TracePro 光学软件中进行蒙特卡洛光线追迹的模拟,在距离接收板 20 m 处接收到一个圆形光斑。对该透镜模型进行法矢修正,优化后的透镜经过模拟仿真,透射能力高达 182 cd/lm,光束角为  $\pm 1.621^\circ$ 。将优化后的透镜与传统的全内反射结构透镜进行对比,经验证发现优化后的透镜对窄光束的调控能力更好。

**关键词** 光学设计; 全内反射结构; 自由曲面; 准直透镜

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0422003

## Design of Collimating Lens with Multiple Freeform Surfaces Based on Total Internal Reflection Structure

Zhou Yanchen<sup>1,2</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, Guangdong 510006, China;<sup>2</sup>Institute of Semiconductors, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510651, China

**Abstract** In this study, a multi-freeform collimating lens is designed based on a total internal reflection structure to effectively obtain a wide range of emitted light from the semiconductor light-emitting diodes to ensure efficient use of light energy. The initial structure of this type of lens is based on Snell's law and is designed using algorithms based on optical principles such as the law of conservation of energy. The initial structure of the lens is imported into the Creo software. Subsequently, a 360° rotation is performed to obtain a three-dimensional solid model. The obtained structure is transferred to the TracePro optical software for Monte Carlo ray tracing simulation. A circle spot is obtained at a distance of 20 m from the receiving board. Further, the normal vector of the lens model is corrected. The optimized lens exhibited light transmittance up to 182 cd/lm and a beam angle of  $\pm 1.621^\circ$  after the simulation. Compared with the traditional total internal reflection structure lens, the optimized lens exhibits an improved ability to control narrow beams.

**Key words** optical design; total internal reflection structure; freeform surface; collimating lens

**OCIS codes** 220.4298; 220.3620; 220.2945

收稿日期: 2020-09-10; 修回日期: 2020-09-24; 录用日期: 2020-10-10

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFB1104500)、广东省科学技术厅(2018B030323017)、广东省重点领域研发计划资助(2020B090922006)、广东省科学院青年科技工作者引导专项(2019GDASYL-0105061)、广东省科学院研究所绩效考核引导专项(2020GDASYL-20200302012)、广东省科学院专题三“千名博士(后)计划”引进专项(2021GDASYL-20210103069)、广东省高校青年创新人才计划(2018KQNCX057)、华南师范大学(19KJ13)

\* E-mail: zzzqing1984@126.com; \*\* E-mail: guoliangchn@163.com

# 1 引言

发光二极管(LED)是一种电光转换的半导体光源,具有体积小、寿命长和节能等超多优点,是 21 世纪最有价值的第四代新型光源<sup>[1-4]</sup>。由于 LED 的光源近似为朗伯光源,因此在实际应用中需要借助一些光学曲面来满足照明要求。自由曲面作为光学曲面的一种,具有灵活的空间布局和极高的设计自由度。使用自由曲面可以缩小照明系统的空间,使得 LED 光源的光束分布得到准确控制,从而实现良好的照明效果。自由曲面的照明设计方法主要有数学设计方法、几何设计方法和优化设计方法三种,光学设计者一般根据自身需求来选择其中一种或多种结合方法进行照明设计。

在众多的光学元件设计方法中,准直光路的设计在探照灯和手电筒等方面具有广泛的应用价值,而且一直受到科研工作者的重视<sup>[5]</sup>。TIR (Total Internal Reflection) 结构常见于二次光学系统设计中,并且自由曲面也越来越多地应用于 LED 二次配光的设计<sup>[5-8]</sup>。根据调查研究,许多光学设计者成功地设计出基于自由曲面的 TIR 准直透镜,而且该透镜的照明效果显著。如江苏大学的王未未<sup>[9]</sup>基于试错法设计了一个发光效率高达 84.8% 的双自由曲面 TIR 准直透镜;中国科学技术大学的詹前靖<sup>[10]</sup>使用了微分方程得到基于点光源的自由曲面 TIR 准直透镜,该透镜的准直性较好,发光效率可达 92%;西安理工大学的刘国强等<sup>[11]</sup>通过求解一系列的微分方程组设计了一个双自由曲面 TIR 准直透镜,该方法对光源的能量利用率在 90.5% 以上,光束的发散半角控制在  $\pm 1.9^\circ$  以内。然而大部分的 TIR 准直透镜都是基于双自由曲面进行设计的。

为了进一步提高光学系统设计的自由度,本文设计出一款由两个以上的自由曲面连接的 TIR 准直透镜,首先给出设计该透镜初始结构的详细算法,然后对其进行法矢修正,最后经过计算机模拟仿真。仿真结果表明,该透镜可以得到良好的光斑效果。

## 2 透镜的算法设计

### 2.1 设计原理

TIR 准直透镜的组成结构如图 1 所示,该透镜由曲线 1、曲线 2、曲线 3、直线 4、曲线 5、曲线 6 和直线 7 构成的横截面绕中心轴旋转  $360^\circ$  得到,组成该横截面的所有曲线均为自由曲线。其中直线 4 和直线 7 不能起到光学的作用,只起到连接两条曲线的

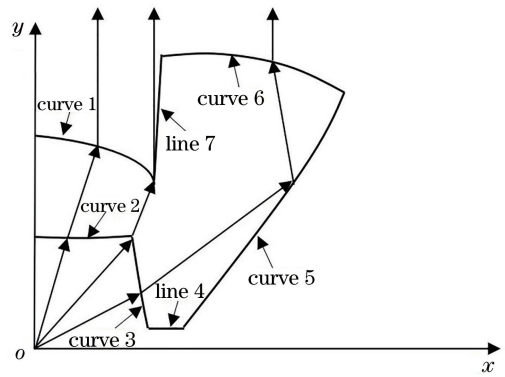


图 1 TIR 准直透镜的组成结构

Fig. 1 Composition structure of TIR collimating lens

作用;曲线 1 和曲线 2 构成 TIR 准直透镜的透射部分,用来对近似为朗伯光源的 LED 光源的小角度光束进行准直;曲线 3、曲线 5 和曲线 6 构成 TIR 准直透镜的反射部分,用来对 LED 光源的大角度光束进行准直。上述两部分的准直光线最终均到达目标的照明区域,故将 TIR 准直透镜分为两部分并分别进行算法设计。定义透镜折射率为  $I$ ,空气折射率为  $I_0 = 1$ 。

### 2.2 透射部分的算法设计

透射部分的算法设计原理如图 2 所示。采用文献<sup>[12]</sup>对于双自由曲面的算法设计,可分别得到曲线 1 上点  $B_{n+1}$  和曲线 2 上点  $A_{n+1}$  的坐标迭代公式,其中  $n$  为正整数。为了与图 1 统一透镜在坐标系中放置的方向,分别将点  $A_{n+1}$  和点  $B_{n+1}$  的横坐标与纵坐标互换。定义点  $A_n$  和点  $B_n$  的坐标分别为  $(x_{an}, y_{an})$  和  $(x_{bn}, y_{bn})$ ,点  $A_{n+1}$  和点  $B_{n+1}$  的坐标分别为  $(x_{a(n+1)}, y_{a(n+1)})$  和  $(x_{b(n+1)}, y_{b(n+1)})$ 。

点  $A_{n+1}$  的迭代公式为

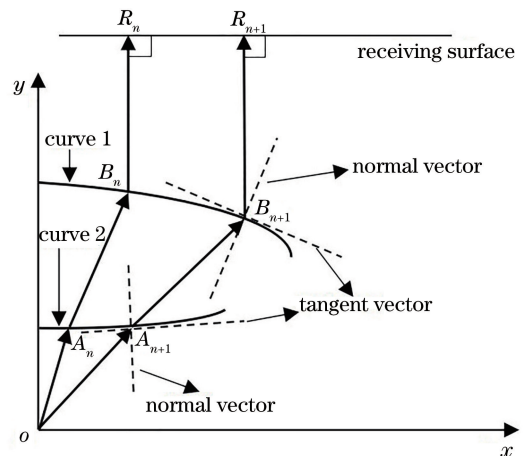


图 2 透射部分的算法设计原理图

Fig. 2 Schematic of algorithm design of transmission part

$$y_{a(n+1)} = \frac{k_{an}y_{an} - x_{an}}{k_{an} - \tan(\Delta\theta + \theta_n)}, \quad (1)$$

$$x_{a(n+1)} = \tan(\Delta\theta + \theta_n) \cdot y_{a(n+1)}, \quad (2)$$

式中:  $k_{an}$  和  $k_{bn}$  分别为过点  $A_n$  和  $B_n$  的切线斜率;  $\theta_n$  为  $\overline{OA_n}$  与  $y$  轴之间的夹角;  $\Delta\theta$  为  $\overline{OA_n}$  与  $\overline{OA_{n+1}}$  之间的夹角。点  $B_{n+1}$  的迭代公式为

$$x_{b(n+1)} = x_{bn} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos 2(\theta_n + \Delta\theta)}{1 - \cos 2\theta_n}}, \quad (3)$$

$$y_{b(n+1)} = y_{bn} + \frac{x_{bn}}{k_{bn}} \cdot \left[ \sqrt{\frac{1 - \cos 2(\theta_n + \Delta\theta)}{1 - \cos 2\theta_n}} - 1 \right]. \quad (4)$$

### 2.3 反射部分的算法设计

反射部分的算法设计原理如图 3 所示。建立二维直角坐标系, LED 光源位于坐标原点处, LED 光线先经过曲线 3 上的  $C$  点后入射到透镜, 再折射至曲线 5 上的  $D$  点, 经过反射后与曲线 6 上的  $E$  点相交, 最后垂直入射并相交接收面于  $S$  点。入射光线  $\overline{OC}$  经过折射后形成透射光线  $\overline{CD}$ , 然后  $\overline{CD}$  经过反射后形成反射光线  $\overline{DE}$ , 最后  $\overline{DE}$  经过折射后形成透射光线  $\overline{ES}$ 。其中  $E$  点的法向量为  $N_E$ , 切向量为  $T_E$ ,  $C$  点的法向量为  $N_C$ , 切向量为  $T_C$ ,  $D$  点的法向量为  $N_D$ , 切向量为  $T_D$ 。

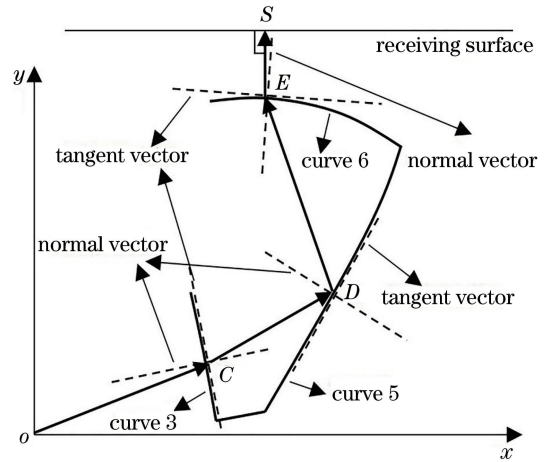


图 3 反射部分的算法设计原理图

Fig. 3 Schematic of algorithm design of reflection part

根据 Snell 定律可知

$$I_0 \cdot \frac{N_1}{|N_1|} \times N_C = I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \times N_C, \quad (5)$$

$$I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \times N_D = I \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \times N_D, \quad (6)$$

$$I \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \times N_E = I_0 \cdot \frac{N_4}{|N_4|} \times N_E, \quad (7)$$

式中:  $N_1 = \overline{OC}$ ;  $N_2 = \overline{CD}$ ;  $N_3 = \overline{DE}$ ;  $N_4 = \overline{ES}$ 。化简 (5)~(7) 式, 可以得到

$$I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} - \frac{N_1}{|N_1|} = \left[ I^2 + 1 - 2I \left( \frac{N_2}{|N_2|} \cdot \frac{N_1}{|N_1|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_C, \quad (8)$$

$$I \cdot \frac{N_3}{|N_3|} - I \cdot \frac{N_2}{|N_2|} = \left[ 2I^2 - 2I^2 \left( \frac{N_3}{|N_3|} \cdot \frac{N_2}{|N_2|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_D, \quad (9)$$

$$I_0 \cdot \frac{N_4}{|N_4|} - I \cdot \frac{N_3}{|N_3|} = \left[ I^2 + I_0^2 - 2I \left( \frac{N_4}{|N_4|} \cdot \frac{N_3}{|N_3|} \right) \right]^{1/2} \cdot N_E. \quad (10)$$

定义点  $C$ 、 $D$ 、 $E$  和  $S$  的坐标分别为  $(x_c, y_c)$ 、 $(x_d, y_d)$ 、 $(x_e, y_e)$  和  $(x_s, y_s)$ 。根据 (8)~(10) 式, 点  $C$ 、 $D$  和  $E$  的法向量可分别表示为

$$N_C = \left( \frac{I \cdot \frac{x_d - x_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}} - \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}}{R_1}, \frac{I \cdot \frac{y_d - y_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}} - \frac{y_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}}{R_1} \right), \quad (11)$$

$$N_D = (X_d, Y_d), \quad (12)$$

$$N_E = \left( \frac{\left[ -I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} \right]}{R_3}, \frac{\left[ 1 - I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} \right]}{R_3} \right), \quad (13)$$

其中

$$X_d = \frac{I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - I \cdot \frac{x_d - x_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}}}{R_2}, \quad (14)$$

$$Y_d = \frac{I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - I \cdot \frac{y_d - y_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}}}{R_2}, \quad (15)$$

$$R_1 = \sqrt{\left[ I \cdot \frac{x_d - x_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}} - \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}} \right]^2 + \left[ I \cdot \frac{y_d - y_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}} - \frac{y_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}} \right]^2}, \quad (16)$$

$$R_2 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad (17)$$

$$R_3 = \sqrt{\left[ -I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} \right]^2 + \left[ 1 - I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} \right]^2}, \quad (18)$$

$$r_1 = I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - I \cdot \frac{x_d - x_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}}, \quad (19)$$

$$r_2 = I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - I \cdot \frac{y_d - y_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}}. \quad (20)$$

继而可得到点 C、D 和 E 的切线斜率,表达式为

$$k_C = \frac{\frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}} - I \cdot \frac{x_d - x_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}}}{I \cdot \frac{y_d - y_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}} - \frac{y_c}{\sqrt{x_c^2 + y_c^2}}}, \quad (21)$$

$$k_D = \frac{\frac{x_d - x_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}} - \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}}{\frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}} - \frac{y_d - y_c}{\sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2}}}, \quad (22)$$

$$k_E = -\frac{-I \cdot \frac{x_e - x_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}}{1 - I \cdot \frac{y_e - y_d}{\sqrt{(x_e - x_d)^2 + (y_e - y_d)^2}}}. \quad (23)$$

算法迭代的推导关系如图 4 所示。选取曲线 3、曲线 5、曲线 6 以及接收板上任意相邻的两点分别为  $C_n, C_{n+1}, D_n, D_{n+1}, E_n, E_{n+1}, S_n$  和  $S_{n+1}$ , 坐标分别为  $(x_{cn}, y_{cn}), (x_{c(n+1)}, y_{c(n+1)}), (x_{dn}, y_{dn}), (x_{d(n+1)}, y_{d(n+1)}), (x_{en}, y_{en}), (x_{e(n+1)}, y_{e(n+1)}), (x_{sn}, y_{sn})$  和  $(x_{s(n+1)}, y_{s(n+1)})$ 。定义  $H$  为光线直线传播的距离,  $\lambda_n$  为  $\overline{OC_n}$  与  $x$  轴之间的夹角,  $\Delta\lambda$  为  $\overline{OC_n}$  与  $\overline{OC_{n+1}}$  之间的夹角。

根据 (21)~(23) 式可分别得到过点  $C_n, D_n$  和  $E_n$  的切线方程,表达式为

$$y - y_{cn} = k_{cn}(x - x_{cn}), \quad (24)$$

$$y - y_{dn} = k_{dn}(x - x_{dn}), \quad (25)$$

$$y - y_{en} = k_{en}(x - x_{en}), \quad (26)$$

式中:  $k_{cn}, k_{dn}$  和  $k_{en}$  分别为点  $C_n, D_n$  和  $E_n$  的切线斜率。当  $\Delta\lambda$  值极小时,点  $C_{n+1}$  在点  $C_n$  的切线上,

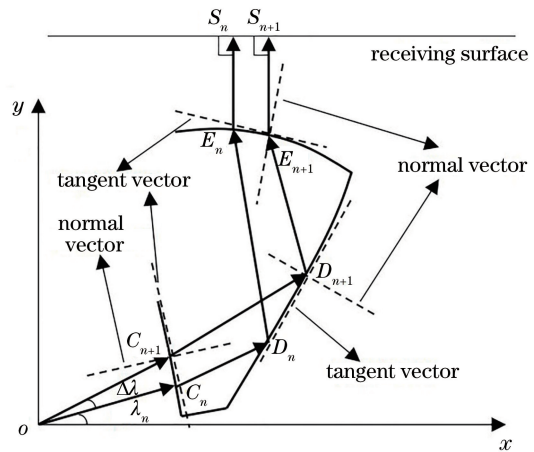


图 4 算法迭代的推导关系示意图

所以联立  $\overline{OC_{n+1}}$  的直线方程与 (24) 式可得到点  $C_{n+1}$  的坐标迭代公式,即

$$x_{c(n+1)} = \frac{y_{cn} - k_{cn} \cdot x_{cn}}{\tan(\lambda_n + \Delta\lambda) - k_{cn}}, \quad (27)$$

$$y_{c(n+1)} = \tan(\lambda_n + \Delta\lambda) \cdot x_{c(n+1)}. \quad (28)$$

根据能量守恒定律可知

$$\frac{\int_0^{\lambda_n} \int_0^{2\pi} i_0 \cos \lambda \sin \lambda \, d\lambda \, d\varphi}{\int_0^{\lambda_n + \Delta\lambda} \int_0^{2\pi} i_0 \cos \lambda \sin \lambda \, d\lambda \, d\varphi} = \frac{\pi \cdot x_{sn}^2}{\pi \cdot x_{s(n+1)}^2}. \quad (29)$$

式中： $\varphi$  为天顶角； $i_0$  为光源垂直方向上的发光强度。化简(29)式可以得到

$$x_{s(n+1)} = x_{c(n+1)} = x_{en} \cdot \sqrt{\frac{\sin^2(\lambda_n + \Delta\lambda)}{\sin^2 \lambda_n}}. \quad (30)$$

当  $\Delta\lambda$  值极小时,点  $E_{n+1}$  在点  $E_n$  的切线上。联立(26)式和(30)式可解点  $E_{n+1}$  的迭代公式,即

$$x_{e(n+1)} = x_{en} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos 2(\lambda_n + \Delta\lambda)}{1 - \cos 2\lambda_n}}, \quad (31)$$

$$y_{e(n+1)} = k_{en} \cdot x_{en} \cdot$$

$$\left[ \sqrt{\frac{1 - \cos 2(\lambda_n + \Delta\lambda)}{1 - \cos 2\lambda_n}} - 1 \right] + y_{en}. \quad (32)$$

当  $\Delta\lambda$  值极小时, $D_n$  与  $D_{n+1}$  之间的距离近似为直线,设该距离为  $f$ ,由勾股定理可得

$$(y_{d(n+1)} - y_{dn})^2 + (x_{d(n+1)} - x_{dn})^2 = f^2. \quad (33)$$

结合(25)式和(33)式,可得  $D_{n+1}$  的迭代公式为

$$x_{d(n+1)} = \frac{f}{\sqrt{1 + k_{dn}^2}} + x_{dn}, \quad (34)$$

$$y_{d(n+1)} = \frac{f \cdot k_{dn}}{\sqrt{1 + k_{dn}^2}} + y_{dn}. \quad (35)$$

$D_{n+1}$  的坐标均由  $f$  来表示。为了控制曲线 3、曲线 5 和曲线 6 的平缓增长,增设一个等式,即

$$Y = (k_{cn} - k_{c(n+1)})^2 + (k_{dn} - k_{d(n+1)})^2 + (k_{en} - k_{e(n+1)})^2. \quad (36)$$

在某一取值范围内,当  $Y$  取得最小值时可得到对应的  $f$  值,即可求出曲线 5 上各点的坐标。至此,反射部分各点的迭代算法推导完成。

### 2.4 透镜模型的建立

将 TIR 准直透镜的两部分算法分别用 C 语言编写至 MATLAB 中并进行仿真,为了使仿真出来的曲线足够平滑,需要不断调试每条曲线的初始值,最终各点的初始值定为  $A_1(0.017, 17.0)$ 、 $B_1(0.256, 32.0)$ 、 $C_1(13.000, 5.0)$ 、 $D_1(18.000, 6.3)$  和  $E_1(17.550, 45.0)$ ,单位均为 mm。定义初始角  $\theta_1 = 0.001^\circ$ 、 $\lambda_1 = 21.06^\circ$ 、步长  $\Delta\theta = 0.001^\circ$  和  $\Delta\lambda = 0.002^\circ$ 。将计算所得离散坐标数据拟合的曲线导入 Creo 建模软件中,各端点使用直线进行连接以形成封闭图形,再绕中心轴旋转  $360^\circ$ ,即可得到实体透镜模型。TIR 准直透镜的折射部分和反射部分的离散点拟合曲线如图 5 所示,TIR 准直透镜的横截面和实体透镜模型如图 6 所示。

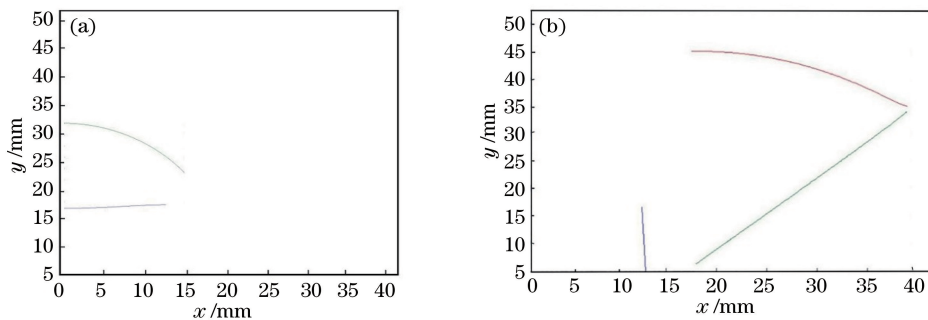


图 5 不同部分的离散点拟合曲线。(a)折射部分;(b)反射部分

Fig. 5 Discrete point fitting curves of different parts. (a) Refraction part; (b) reflection part

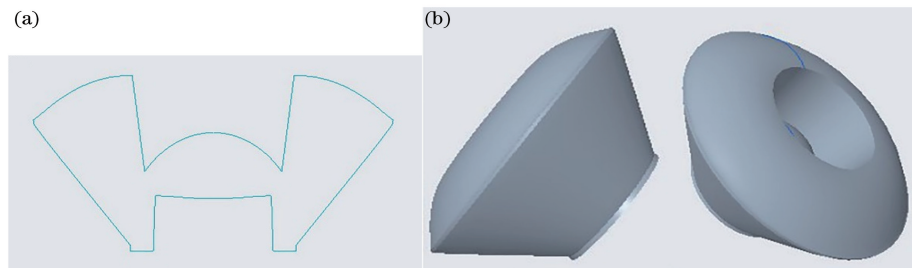


图 6 TIR 准直透镜。(a)二维横截面示意图;(b)三维示意图

Fig. 6 TIR collimating lens. (a) Schematic of two-dimensional cross-section; (b) three-dimensional diagram

### 3 TIR 准直透镜初始结构的模拟仿真结果分析

将 TIR 准直透镜的三维模型导入光学软件 TracePro 中,材料选为塑料中的高透光材料,即聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),透镜材料的折射率为 1.49386。平面朗伯光源的尺寸为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ,设置总光通量为  $10\text{ lm}$ ,模拟追迹的总光线数为  $5.0 \times 10^5$  万条。在距离光源  $20\text{ m}$  处建立一个尺寸为  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  的接收板以进行蒙特卡洛光线追迹,光线追迹结果如图 7 所示。从图 7 可以看到,角度为  $120^\circ$  的朗伯光源经过透镜后,大部分光线被准直,基本满足准直透镜的设计要求。光斑在接收板上的效果如图 8 所示。配光曲线如图 9 所示。从图 9 可以看到,投射能力  $K$  值为  $180\text{ cd/lm}$ ,光束角为  $\pm 1.665^\circ$ 。光斑全彩图如图 10 所示。从图 10 可以看到,光斑并未很好的融合,故对初始结构进行优化。

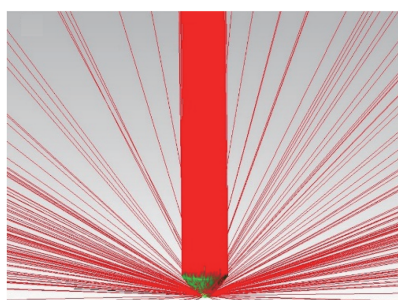


图 7 光线追迹结果

Fig. 7 Ray tracing results

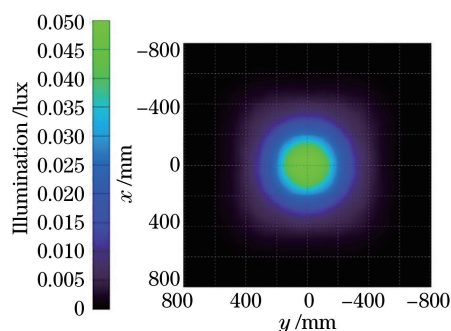


图 8 光斑在接收板上的效果

Fig. 8 Effect of light spot on receiving board

### 4 TIR 准直透镜优化后的模拟仿真结果分析

使用 MATLAB 软件计算出的精确离散点在拟合成光滑曲线后会引入误差,即曲线上各点的法线矢量会轻微偏离原先计算好的方向,故需要对法矢进行修正以提高  $K$  值和减小光束角。

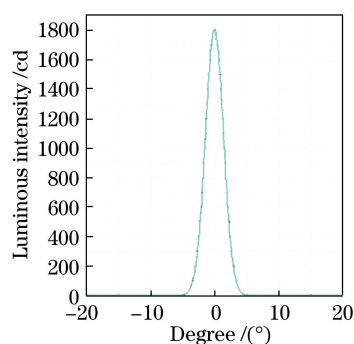


图 9 配光曲线

Fig. 9 Distribution curve flux



图 10 光斑全彩图

Fig. 10 Full color view of spot

在 TIR 透镜的正上方  $2\text{ mm}$  处建立一个厚度为  $200\text{ mm}$  和长度为  $0.1\text{ mm}$  的管状元件,由于只对 TIR 反射部分进行法矢修正,故使该管状元件底部位置的横坐标恒定不变,纵坐标设为只在曲线 6 上方移动的变量。纵坐标每改变一个数值,都需要对其进行蒙特卡洛光线追迹,从而观察从管状元件出来的光斑是否位于接收板的中心位置。若光斑偏离中心位置,说明法矢发生偏离,则计算光斑中心与接收板中心位置的偏差值,从而计算法矢偏离的斜率。经测试发现,管状元件的纵坐标在  $26 \sim 38\text{ mm}$  之间,法矢发生偏离,故将管状元件的纵坐标分别以  $3\text{ mm}$  的间距设为  $26, 29, 32, 35, 38\text{ mm}$ ,计算这 5 个法矢斜率偏离量的平均值并补偿到  $k_E$  上,通过 MATLAB 软件可重新计算各曲线上的离散点并对其进行仿真和结果分析。不断重复上述步骤,直到 5 个光斑几乎位于接收板的中心处,说明法矢得到良好的修正。最终优化结果是在  $k_E$  的算法表达式上增加  $0.0044$  的斜率偏离量,修正前的 5 个光斑如图 11(a) 所示,修正后的 5 个光斑如图 11(b) 所示。法矢得到修正后的辐照度和配光曲线分别如图 12 和图 13 所示。从图 12 和图 13 可以看到,中间光斑明显增大且亮度有所增加, $K$  值增大至  $182\text{ cd/lm}$ ,光束角缩小为  $\pm 1.621^\circ$ 。法矢修正后的光斑全彩图如图 14 所示。从图 14 可以看到,光斑得到较好的融合效果。

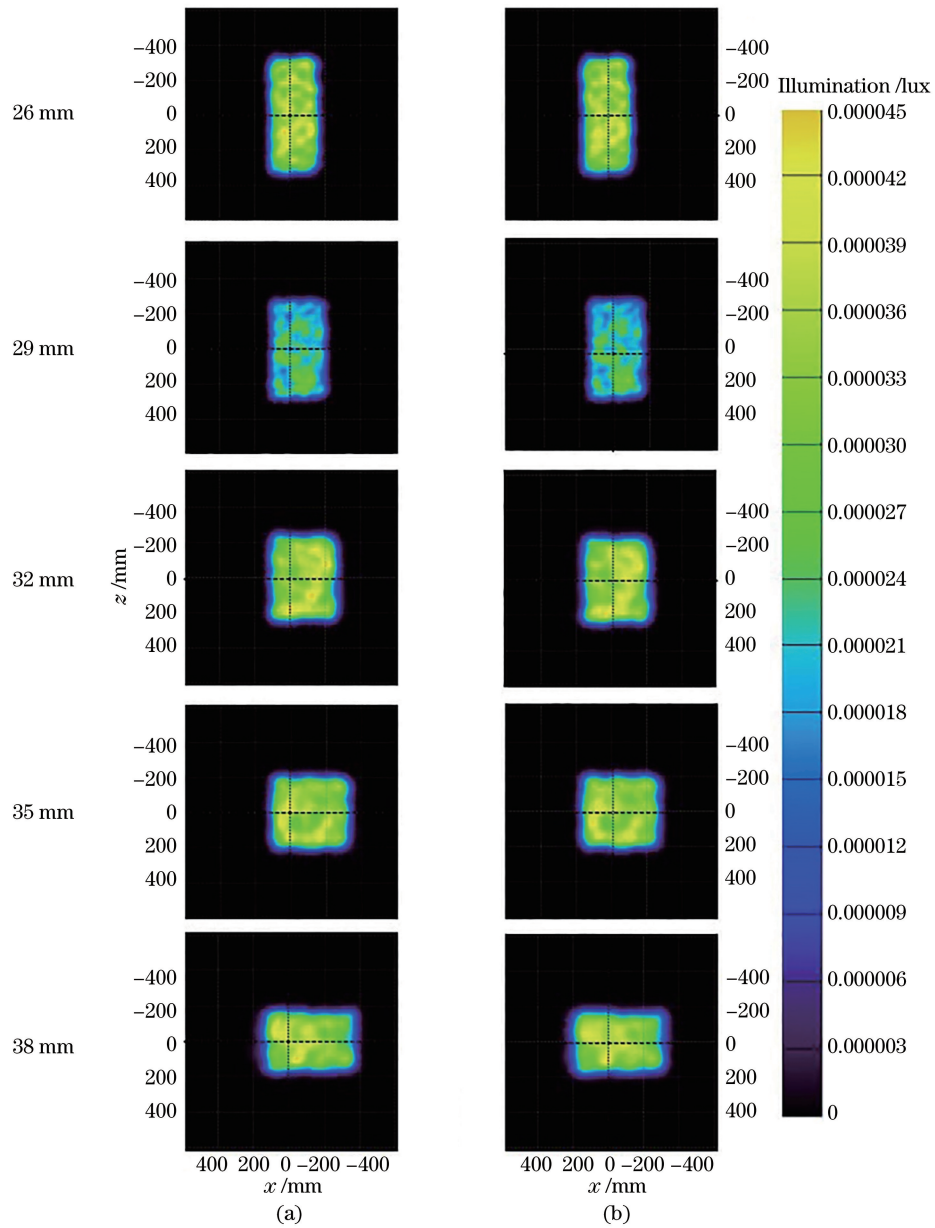


图 11 法矢修正前后的光斑图。(a)修正前;(b)修正后

Fig. 11 Light spot before and after amendment normal vector. (a) Before amendment; (b) after amendment

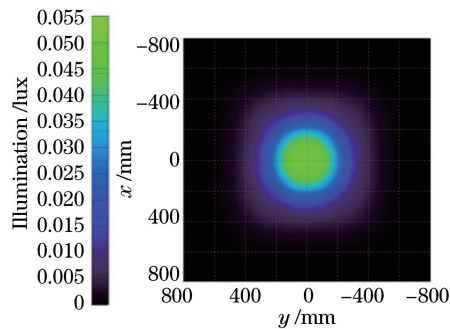


图 12 法矢修正后的辐照度

Fig. 12 Irradiance after amendment normal vector

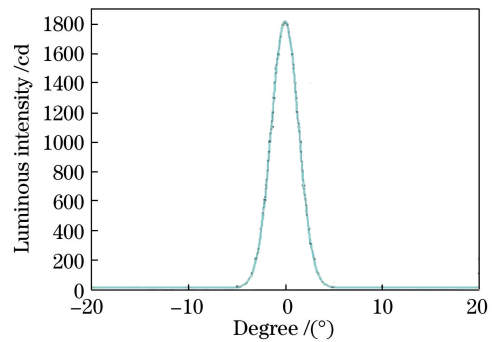


图 13 法矢修正后的配光曲线

Fig. 13 Light distribution curve after amendment normal vector



图 14 法矢修正后的光斑全彩图

Fig. 14 Full color image after amendment normal vector

为了验证优化后的多自由曲面 TIR 准直透镜对窄光束的调控能力,将其与传统的 TIR 准直透镜进行光学性能对比。传统的 TIR 准直透镜中透射部分的入射面和出射面均为自由曲面,但在反射部分只有曲线 5 是自由曲线,曲线 3 和曲线 6 均为直线,基于试验使用的迭代算法易得到该透镜的初始结构。传统的 TIR 准直透镜初始结构和光线追迹结果分别如图 15 和图 16 所示。将两款 TIR 准直透镜的 3D 模型分别导入 TracePro 软件中,其材料均设为 PMMA,中间透射部分均设为表面吸收,均采用尺寸为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的朗伯光源,设置其光通量为  $1\text{ lm}$ ,追迹光线数均设为  $1.0 \times 10^6$  万条,且两款透镜的出光面的面积相同,最后分别对其进行蒙特卡洛光线追迹可分别得到对应的配光曲线。优化后的多自由曲面 TIR 准直透镜和传统的 TIR 准直透镜的配光曲线如图 17 所示。从图 17 可以看

到,两款透镜的  $K$  值接近,但优化后的多自由曲面 TIR 准直透镜的光束角为  $\pm 1.181^\circ$ ,而传统的 TIR 准直透镜的光束角为  $\pm 1.328^\circ$ 。综上所述,与传统的 TIR 准直透镜相比,多自由曲面 TIR 准直透镜对窄光束的调控能力更强,而且光强分布曲线过渡更平缓。

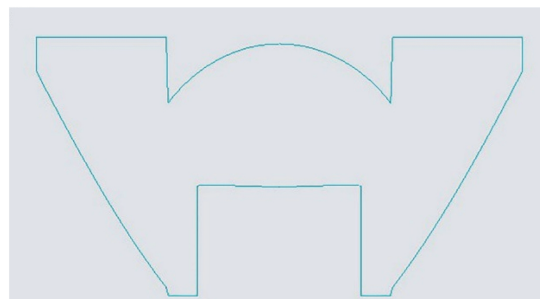


图 15 传统的 TIR 准直透镜初始结构

Fig. 15 Initial structure of traditional TIR collimating lens

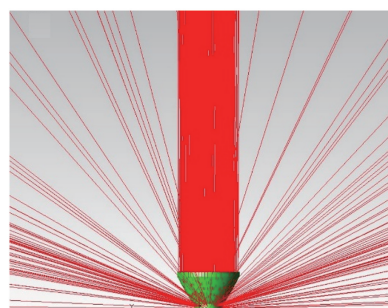


图 16 传统的 TIR 准直透镜的光线追迹结果

Fig. 16 Ray tracing results of traditional TIR collimating lens

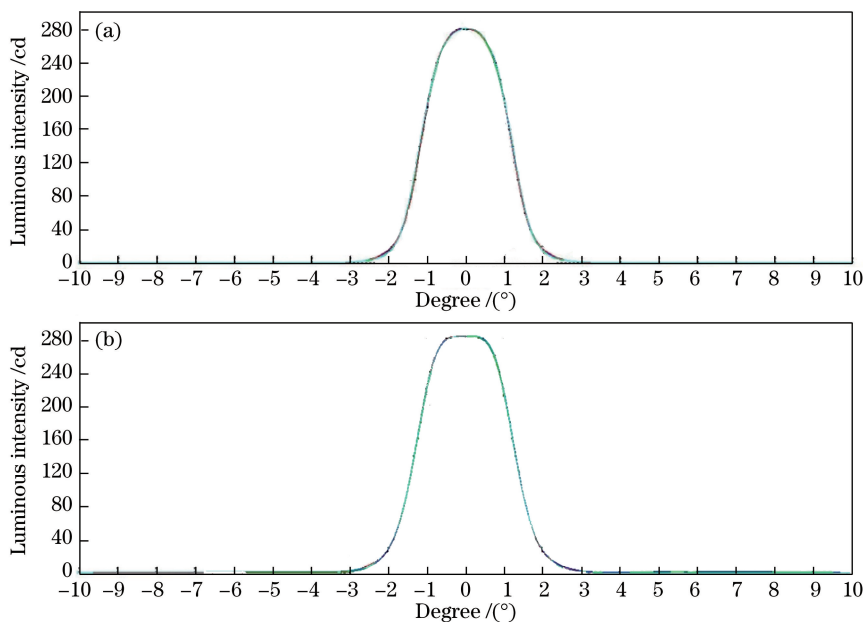


图 17 不同透镜的配光曲线。(a)优化后的 TIR 准直透镜;(b)传统的 TIR 准直透镜

Fig. 17 Light distribution curves of different lenses. (a) TIR collimating lens after optimization; (b) traditional TIR collimating lenses



## 5 结 论

基于非成像光学的设计思想在 TIR 准直透镜的透射部分和反射部分应用多个自由曲面,利用 MATLAB 软件计算各曲线的离散数据点并拟合成光滑的曲线,再利用 3D 建模软件构建实体透镜模型,并将其放入 TracePro 软件中进行仿真,后续对透镜的初始结构进行法矢的修正,最终获得  $K$  值为 182 cd/lm 和光束角为  $\pm 1.621^\circ$  的光学准直系统。与传统的单自由曲面 TIR 准直透镜相比,该透镜调控窄光束的能力更强。该准直系统结构具有较好的准直效果和较大的  $K$  值,折叠光学系统可以实现系统的小型化,设计更大的自由度和较小的光束角有利于后续的光学系统设计,为 LED 的光束整形提供实用价值和指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Mueller-Mach R, Mueller G O. White-light-emitting diodes for illumination [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3938: 30-41.
- [2] Wang H O, Li G A. Understanding lighting LED [J]. China Light & Lighting, 2004(2): 1-3.  
王海鸥, 李广安. 认识照明 LED [J]. 中国照明电器, 2004(2): 1-3.
- [3] Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (4): 0422002.  
朱民, 楼俊, 潘玉珏, 等. 基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计 [J]. 光学学报, 2018, 38 (4): 0422002.
- [4] Zhao W, Liu X, Li H F. Design of laser projection display illumination system based on freeform surface array [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (6): 0622001.  
赵伟, 刘旭, 李海峰. 基于自由曲面阵列的激光投影显示照明系统设计 [J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0622001.
- [5] Chen J J, Lin C T. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens [J]. Optical Engineering, 2010, 49(9): 093001.
- [6] Doskolovich L L, Moiseev M A. Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle [J]. Journal of Optical Technology, 2009, 76(7): 430-434.
- [7] Liu D, Zhang X, Chen C. Free-form lens for rectangular illumination with the target plane rotating at a certain angle [J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2015, 32(11): 1958-1963.
- [8] Ni D W, Li X Y, Yang M Y, et al. Large field of view space-based optical detection system based on freeform surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (11): 1122003.  
倪栋伟, 李旭阳, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场天基探测光学系统 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1122003.
- [9] Wang W W. Design and application of LED collimating lens based on TIR [J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(1): 5-8.  
王未未. 基于 TIR 结构 LED 准直透镜的设计与实现 [J]. 电子科技, 2016, 29(1): 5-8.
- [10] Zhan Q J. Simulation analysis and application of SMD LED cup type [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.  
詹前靖. 中国科学技术大学 SMD LED 杯型仿真分析及应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [11] Liu G Q, Zhao H, Hua D X, et al. Collimation of LED light source based on freeform surface [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34 (1): 87-91, 103.  
刘国强, 赵恒, 华灯鑫, 等. 基于自由曲面设计的 LED 光源系统光束准直研究 [J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(1): 87-91, 103.
- [12] 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.  
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.