

# 紫外光固化 LED 线光源的光学系统设计及仿真

孔晓慧 白廷柱 杨雅丽

(北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 针对紫外光固化技术领域中 365 nm 紫外 LED 光源进行了应用研究,提出了用菲涅耳透镜替代传统的柱透镜实现光源线聚焦的技术方案,给出了设计过程与仿真结果。从已有的平板菲涅耳透镜的结构设计公式出发,推导了在透镜通光孔径、焦距范围已知的情况下,平板基底厚度、焦距等参数的确定依据,设计出了相应的点聚焦和线聚焦菲涅耳透镜,组成紫外光固化 LED 线光源的光学系统。运用 Tracepro 软件建立了菲涅耳透镜系统模型和柱透镜系统模型,通过光线追迹分析了能量利用率、辐照度均匀性等重要指标。仿真结果表明:采用菲涅耳透镜的光学系统可以实现应用目标面上的光学技术指标,提高了能量利用率及辐照度均匀性。

**关键词** 光学设计;紫外光固化;线聚焦;菲涅耳透镜

**中图分类号** O432 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0222002

## Optical System Design and Simulation of LED Line Source for Ultraviolet Curing

Kong Xiaohui Bai Tingzhu Yang Yali

(Key Laboratory of Optoelectrical Imaging Technique and System, Ministry of Education,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** An application research on 365 nm ultraviolet LED used in the field of ultraviolet curing is performed, and a technical method using Fresnel lens to replace traditional cylindrical lens is suggested to realize line focusing of the light source. The design process and simulation results are provided. Based on foregone flat Fresnel lens design formulae, determination basis of fundus thickness and focus with known clear aperture diameter and focus range is deduced. The optical system includes point-focusing Fresnel lens and line-focusing Fresnel lens. The models of Fresnel lens optical system and cylindrical lens optical system are established with a tracepro software. Important indexes including energy utilization efficiency and irradiance uniformity are analyzed with ray tracing. Simulation results show that the optical system using Fresnel lens can reach the optical technological indexes on the target plane and provide higher energy utilization efficiency and irradiance uniformity.

**Key words** optical design; ultraviolet curing; line-focusing; Fresnel lens

**OCIS codes** 040.7190; 080.2740; 080.4295; 230.3670

## 1 引 言

紫外光固化<sup>[1]</sup>是一种采用紫外辐射照射涂料或胶体使其快速凝固成形的技术,广泛应用于印刷等行业。紫外光源是制约紫外光固化技术发展的关键因素之一。传统紫外光源是高压汞灯,由于温度、时间和能耗等原因其应用受到制约。相对于汞灯等传统光源,LED 具有发光效能高、光谱纯度高(主要集

中在固化材料最敏感的 365 nm 附近)、成本低、体积小、无环境污染、耗电量低和寿命长等优点,具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。目前市场上已出现了基于 LED 的新型紫外光固化用点光源及线光源产品,但输出光斑经常无法满足光固化的要求。谢军等<sup>[3,4]</sup>对基于单个紫外 LED 的点聚焦光源的光学系统进行过研究,芦永军等<sup>[2,5]</sup>提出了空间阵列排布实现

**收稿日期**: 2012-06-28; **收到修改稿日期**: 2012-09-21

**作者简介**: 孔晓慧(1989—),女,硕士研究生,主要从事 LED 照明方面的研究。E-mail: nlgkxh@163.com

**导师简介**: 白廷柱(1955—),男,博士,教授,主要从事光电成像技术、光电检测技术、图像信息处理技术等方面的研究。

E-mail: tzhbai@bit.edu.cn

能量累加的线光源技术方案。提高目标面上的辐照度及其均匀性,可以缩短固化时间、提高固化效率,同时对降低电源功率、改善系统散热具有重要意义。采用 LED 阵列排布的线光源有时无法满足设备体积小和输出光斑宽度极细的要求,本文针对部分设备体积小和光斑细的要求,研究设计了一个采用菲涅耳透镜进行光束整形的线光源光学系统,根据设计要求给出了菲涅耳透镜结构参数设计的推导过程,并对光学系统进行了仿真。

## 2 系统设计原理

目前的紫外 LED 线光源通常都采用柱透镜,由于单颗紫外 LED 的辐射发散角比较大,再加上柱透镜的厚度较大,因此目标面上的能量利用率较低。为了改善以上问题,拟采用菲涅耳透镜进行光束整形,使 LED 光源发出的光先经过点聚焦型菲涅耳透镜平行出射,然后经过线聚焦型菲涅耳透镜聚焦成线。根据对聚焦线长度的要求,需在线聚焦菲涅耳透镜前方将几片点聚焦菲涅耳透镜拼接在一起。为了减小光能损失,需要将点聚焦菲涅耳透镜做成正方形,即截取其内接正方形区域,然后再拼接起来。整个系统的通光孔径设计为 10 mm,聚焦线长度为 20 mm,宽度控制在 1 mm 以内,所以单片点聚焦菲涅耳透镜的半径应为  $5\sqrt{2}$  mm 约等于 7 mm,即其通光孔径  $D$  等于 14 mm。

研究表明出射面有槽沟的菲涅耳透镜光学效率最高<sup>[6,7]</sup>。设在菲涅耳透镜轴线上  $F$  点处有一点光源,由它发出的光束通过透镜,会聚于透镜的另一侧  $F'$  点处。 $\theta_n, \theta'_n, \beta_n, \beta'_n$  分别为在透镜斜面和平面两侧的人射角和折射角。郭孝武等<sup>[8]</sup>提出的菲涅耳透镜的一般设计公式为

$$\tan \alpha_n = \frac{\sin u'_n + \sin u_n}{\sqrt{N^2 - \sin^2 u'_n} - \cos u_n} = \frac{\frac{r'_n}{\sqrt{f'^2 + r_n'^2}} + \frac{r_n}{\sqrt{(f-h)^2 - r_n^2}}}{\sqrt{N^2 - \frac{r_n'^2}{f'^2 + r_n'^2}} - \frac{f-h}{\sqrt{(f-h)^2 - r_n^2}}}, \quad (1)$$

式中  $\alpha_n$  为每个小三角形斜面和透镜平面的夹角,  $u_n, u'_n$  分别为入射光、折射光与光轴  $FF'$  的夹角;  $r_n, r'_n$  分别为入射点  $A, B$  距透镜光轴  $OO'$  的距离,  $f, f'$  分别为  $F, F'$  点距透镜平面一侧  $O'$  点的距离,  $N$  为透镜材料的折射率。

当点光源位于透镜的焦点处,从平面一侧入射时,平行光会从透镜的曲折面一侧出射,即  $f = \infty$ ,

$u_n = 0^\circ$ , 并且以  $\Delta r$  为定值刻划, 则(1)式变为

$$\cot \alpha_n = \sqrt{\frac{N^2 f'^2}{r_n'^2} + N^2 - 1} - \sqrt{\frac{f'^2}{r_n'^2} + 1}. \quad (2)$$

## 3 菲涅耳透镜的设计

由于紫外 LED 的半强度角较大,并且出于系统体积和紧凑性的考虑,要求 LED 与透镜的距离很短,即透镜的焦距很短,只有几个毫米。为保证较高的光能利用率,应尽量增大透镜的相对孔径  $D/f'$ , 这样带来的问题是,入射到小三角形斜边上的光线可能发生全反射。要保证不发生全反射,应满足条件  $\theta'_n < \theta_c$  ( $\theta_c$  为临界角)。

由全反射定律可知,  $\theta_c$  等于  $\arcsin \frac{1}{N}$ , 取  $N = 1.47454$  (石英在 365 nm 下的折射率), 则  $\theta_c$  约  $= 42.7^\circ$ 。

$$\theta'_n = \alpha_n - \beta_n = \alpha_n - u'_n < \theta_c, \quad (3)$$

$$\tan \theta'_n = \tan(\alpha_n - u'_n) < \tan \theta_c, \quad (4)$$

$$\cot(\alpha_n - u'_n) > \cot \theta_c, \quad (5)$$

$$\cot(\alpha_n - u'_n) = \frac{1 + \cot \alpha_n \cot u'_n}{\cot u'_n - \cot \alpha_n}, \quad (6)$$

式中  $\cot \alpha_n = \sqrt{\frac{N^2 f'^2}{r_n'^2} + N^2 - 1} - \sqrt{\frac{f'^2}{r_n'^2} + 1}$ ,  $\cot u'_n = \frac{f'}{r'_n}$ , 代入(6)式得

$$\cot(\alpha_n - u'_n) = \frac{1 + \left( \sqrt{\frac{N^2 f'^2}{r_n'^2} + N^2 - 1} - \sqrt{\frac{f'^2}{r_n'^2} + 1} \right) \frac{f'}{r'_n}}{\frac{f'}{r'_n} - \left( \sqrt{\frac{N^2 f'^2}{r_n'^2} + N^2 - 1} - \sqrt{\frac{f'^2}{r_n'^2} + 1} \right)}. \quad (7)$$

图 1 是光线从菲涅耳透镜的平面入射后,在平板基底中的光路的截面图。假设菲涅耳透镜的半径为  $R$ , 基底厚度为  $d$ , 光源位于焦点  $F'$  处,从平面入射,  $u'_n$  为入射光与光轴的最大夹角,透镜边缘部分的入

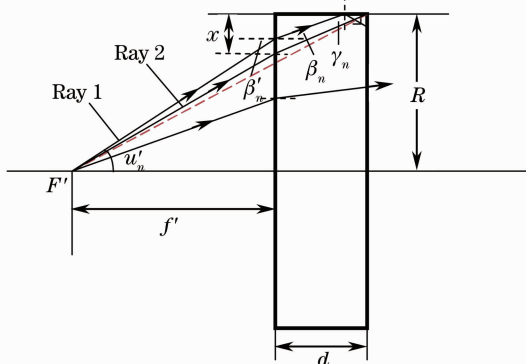


图 1 菲涅耳透镜平板基底中的光路

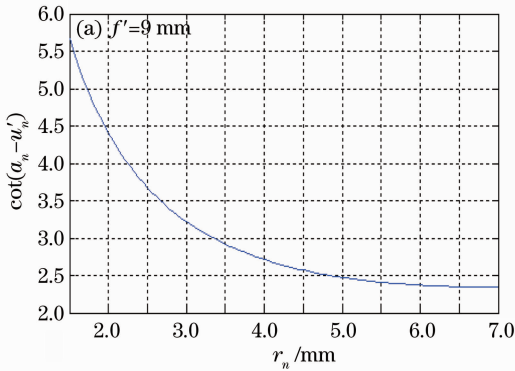
Fig. 1 Light path in flat fundus of Fresnel lens

射光(以光线 1 为例)经过一次折射后,可能入射到平板基底的边缘面, $\beta_n$  为第一次折射的折射角,此面上的入射角为  $\gamma_n$ ,由于  $\beta_n < u'_n < \theta_c$ ,  $\gamma_n = 90^\circ - \beta_n > 90^\circ - \theta_c = 47.3^\circ$ , 所以该光线会在上边缘面发生全反射从而影响光路。临界情况是入射光经过一次折射后,恰好入射到上边缘面的最右边,此临界入射光如光线 2 所示。由折射定律及三角函数关系可得

$$\begin{cases} \frac{\sin \beta'_n}{\sin \beta_n} = N \\ \sin \beta_n = \frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}} \\ \sin \beta'_n = \frac{R - x}{\sqrt{f'^2 + (R - x)^2}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $x$  为入射光线距透镜平板基底上边缘面的距离。 $f'$  可表示为

$$f' = (R - x) \frac{\sqrt{x^2 + d^2 - N^2 x^2}}{Nx}. \quad (9)$$



如图 1 所示,入射高度超过  $R - x$  的光线经过一次折射后会在上边缘面发生全反射。综上可知,在设计过程中要同时保证  $f'$  和  $x$  都比较小。为了简化计算,忽略第一次折射,即图 1 中虚线的情况,几何关系为

$$d = \frac{xf'}{R - x}, \quad (10)$$

将  $x$  限定在一个环距以内。

菲涅耳透镜的环距设计为 0.5 mm,则  $x$  小于等于 0.5。对于点聚焦菲涅耳透镜,设计焦距为 9 mm,  $R = 7$  mm,则  $d \leq \frac{0.5 \times 9}{7 - 0.5} \approx 0.69$  mm;对于线聚焦菲涅耳透镜,焦距为 7 mm,  $R = 5$  mm,则  $d \leq \frac{0.5 \times 7}{5 - 0.5} \approx$

0.78 mm。

将  $f' = 9$  mm,  $N = 1.47454$  代入(7)式中,得到  $\cot(\alpha_n - u'_n)$  关于  $r'_n$  的曲线,如图 2(a)所示。同理,  $f' = 7$  mm,得到的相应曲线如图 2(b)所示。

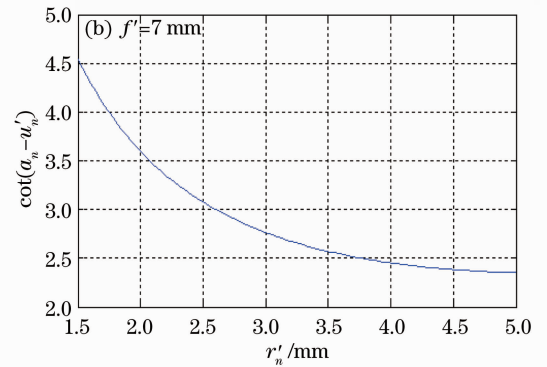


图 2 不同  $f'$  下  $\cot(\alpha_n - u'_n)$  与  $r'_n$  的关系

Fig. 2 Relation between  $\cot(\alpha_n - u'_n)$  and  $r'_n$  with different  $f'$

从图 2 可以看出,  $\cot(\alpha_n - u'_n)$  与  $r'_n$  成反比关系,  $\cot \theta_c = 1.0837$ , 在  $r'_n$  的取值范围内,均满足  $\cot(\alpha_n - u'_n) > \cot \theta_c$ , 因此所选择的设计参数满足前面提出的条件  $\theta'_n < \theta_c$ 。

## 4 设计结果

### 4.1 点聚焦菲涅耳透镜

单片菲涅耳透镜的最大半径为 7 mm,焦距为 9 mm,环距为 0.5 mm,平板基底厚度取 0.5 mm,材料折射率为 1.47454,代入(2)式,结构参数如表 1 所示。用 Solidworks 软件建立其模型如图 3 所示,经切割后的正方形透镜如图 4 所示。

### 4.2 线聚焦菲涅耳透镜

透镜宽度  $D$  为 10 mm,焦距为 7 mm,环距为 0.5 mm,平板基底厚度取 0.5 mm,材料折射率为 1.47454,长度为 20 mm,代入(2)式,结构参数如表 2

所示。用 Solidworks 软件建立其模型如图 5 所示。

表 1 点聚焦菲涅耳透镜的结构参数

Table 1 Structure parameters of point-focusing Fresnel lens

$n$	$r'_n$ /mm	$\alpha_n$ /( $^\circ$ )
1	0.25	3.35
2	0.75	9.97
3	1.25	16.38
4	1.75	22.44
5	2.25	28.09
6	2.75	33.28
7	3.25	37.99
8	3.75	42.25
9	4.25	46.07
10	4.75	49.5
11	5.25	52.56
12	5.75	55.31
13	6.25	57.76
14	6.75	59.96

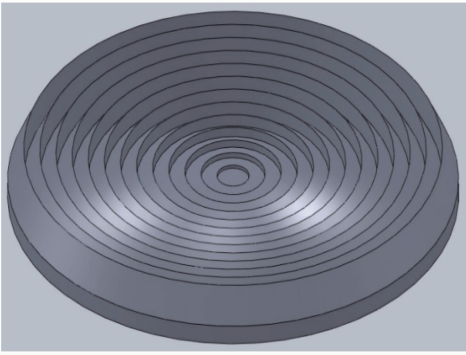


图 3 点聚焦菲涅耳透镜模型

Fig. 3 Model of point-focusing Fresnel lens

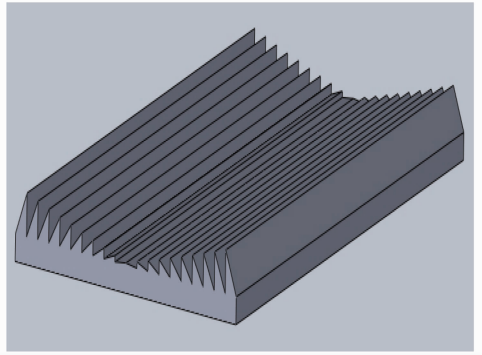


图 5 线聚焦菲涅耳透镜模型

Fig. 5 Model of line-focusing Fresnel lens

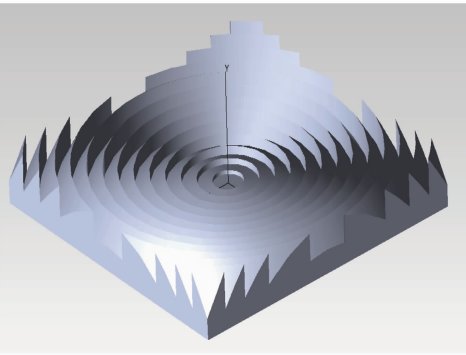


图 4 正方形点聚焦菲涅耳透镜模型

Fig. 4 Model of rectangular point-focusing Fresnel lens

表 2 线聚焦菲涅耳透镜结构参数

Table 2 Structure parameters of line-focusing Fresnel lens

$n$	$r'_n / \text{mm}$	$\alpha_n / (^\circ)$
1	0.25	4.31
2	0.75	12.75
3	1.25	20.75
4	1.75	28.09
5	2.25	34.67
6	2.75	40.48
7	3.25	45.55
8	3.75	49.95
9	4.25	53.78
10	4.75	57.09

## 5 系统光路模拟及分析

目前,LED 的发光模型有蒙特卡罗光线追迹模型和数学模型两种<sup>[9]</sup>。紫外固化材料广泛使用的紫外 LED 的中心波长为 365 nm,本文采用日亚公司

的 NC4U133A 365 nm 紫外 LED,半强度角为 55°,辐射通量为 1 W,以此为依据在 Tracepro 软件中建立 LED 光源的蒙特卡罗光线追迹模型<sup>[10]</sup>。紫外 LED 线光源通常采用的都是柱透镜,为了配合本系统,取半径为 5 mm,长度为 20 mm,截面为半圆的柱透镜。由于聚焦线长度为 20 mm,所以需要两片正方形点聚焦菲涅耳透镜拼接在一起,然后将柱透镜近贴于其后,将透镜模型导入光学设计软件 Tracepro 中进行光路模拟,系统如图 6 所示,模拟结果如图 7 所示。作为对比,将柱透镜换成线聚焦菲涅耳透镜,系统如图 8 所示,模拟结果如图 9 所示。

如图 8 和图 9 中的剖面辐照度曲线所示,聚焦线长度为 20 mm,将其等分为 20 段,忽略边缘两点,取其他 19 个点,记下各点的纵坐标值,并求其平均值。由于纵坐标归一化至最大辐照度,因此可以用平均值来表示目标面上的辐照度均匀度  $R$ 。两种系统的最终对比结果如表 3 所示。

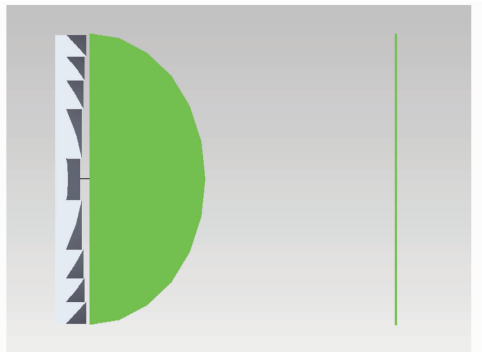


图 6 采用柱透镜的线聚焦光学系统

Fig. 6 Line-focusing optical system with cylindrical lens

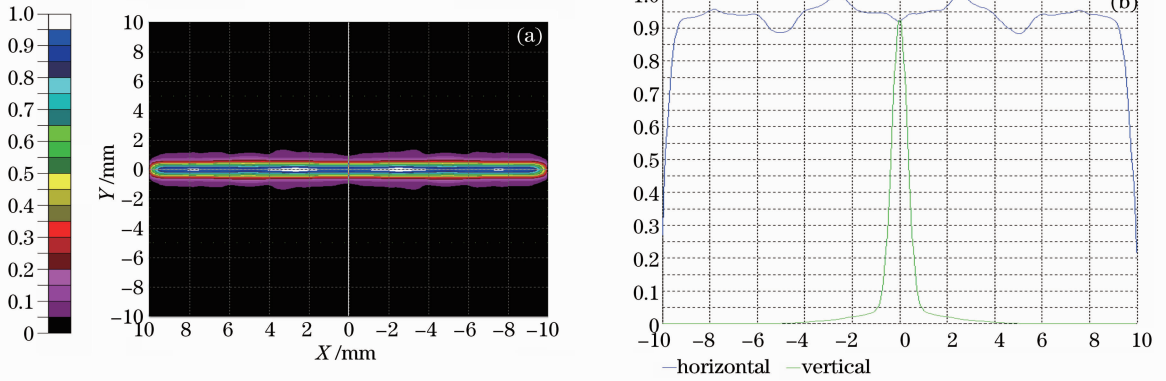


图 7 采用柱透镜的目标面辐照度图及其剖面图

Fig. 7 Irradiance map and section map on target plane with cylindrical lens

从表 3 可以看出,两种系统的聚焦光斑尺寸均为 20 mm×0.8 mm,菲涅耳透镜系统比柱透镜系统结构更加紧凑;菲涅耳透镜系统的能量利用率明显高于柱透镜系统,如果在透镜表面镀一层 365 nm 增透膜,则可以进一步提高能量利用率;从辐照度剖面图对比可以看出,柱透镜系统有两个明显的波峰和波谷,而菲涅耳透镜系统的起伏则较小,辐照度均匀性也优于前者。综合来看,采用菲涅耳透镜能够提高系统的能量利用率及目标面上的辐照度均匀性。

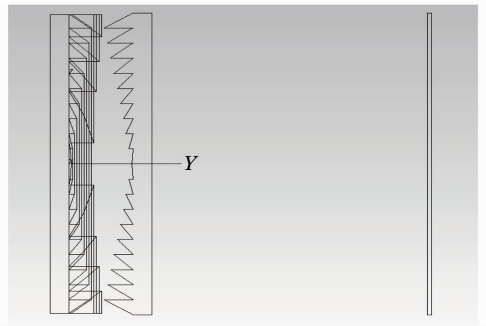


图 8 采用菲涅耳透镜的线聚焦光学系统

Fig. 8 Line-focus optical system with Fresnel lens

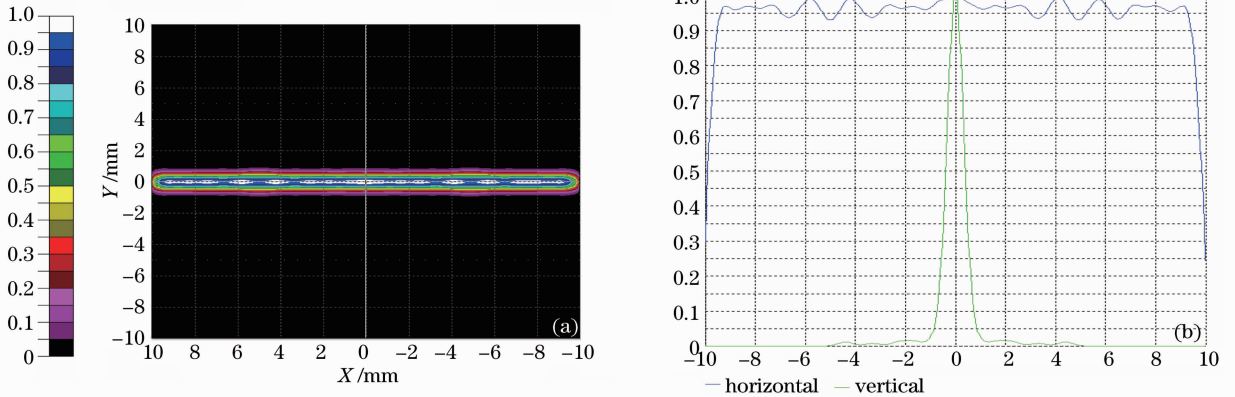


图 9 采用菲涅耳透镜的目标面辐照度图及其剖面图

Fig. 9 Irradiance map and section map on target plane with Fresnel lens

表 3 两种系统模拟结果对比

Table 3 Contrast of simulation results of two systems

	Total radiant energy flux /W	Total radiant energy flux of exiting light /W	Energy utilization efficiency /%	Highest irradiance / $(W \cdot m^{-2})$	Focal line width /mm	Total length of the optical path /mm	R /%
Cylinder lens system	2	1.0488	52.44	55056	0.8	23.4	94.2
Fresnel lens system	2	1.3727	68.64	77344	0.8	18.4	96.4

## 6 结 论

在紫外光固化领域,相对于汞灯等传统光源,LED具有成本低、体积小、无环境污染、耗电量低和寿命长等优点,具有较高的性价比,其应用范围日益广泛。目前紫外LED线光源通常采用的都是柱透镜,由于单颗紫外LED的辐射发散角比较大,再加上柱透镜的厚度较大,因此目标面上的能量利用率较低。为了改善以上问题,采用菲涅耳透镜进行光学系统设计,结果表明设计方案满足具体指标要求且结构紧凑,对于紫外光固化LED线光源的拓展性研究与系统设计开发具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Shengwu, Shi Wenfang. The market and development of UV/EB curing technology [J]. *J. Radiation Research and Radiation Processing*, 2001, **19**(3): 161~167  
朱胜武, 施文芳. 紫外光/电子束固化市场状况及发展趋势[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2001, **19**(3): 161~167
- 2 Lu Yongjun, Xu Wenhai, Zhao Huan *et al.*. Design a single spot UV-curing system with two-dimensional UV-LED array[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(1): 16~19  
芦永军, 许文海, 赵欢等. 二维空间紫外LED阵列实现单光斑辐照度固化系统的设计[J]. *应用光学*, 2009, **30**(1): 16~19
- 3 Xie Jun, You Lide, Hou Wenjie. Experimental research of ultraviolet LED source system in stereolithography apparatus[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(2): 100~104  
谢军, 游立德, 侯文杰. 光固化快速成形中的紫外LED光源

- 系统实验研究[J]. *光电工程*, 2009, **36**(2): 100~104
- 4 Yang Jie. Design and Research of UV LED Curing System[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. 32~44  
杨杰. UV LED紫外固化系统设计与研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 32~44
- 5 Lu Yongjun, Xu Wenhai, Qu Yanling *et al.*. Optical system design of two dimensional array of 365 nm UV LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 268~271  
芦永军, 许文海, 曲艳玲等. 365 nm紫外LED二维空间阵列光学系统设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 268~271
- 6 E. A. Krasina, E. V. Tveriyanovich, A. V. Romankevich. Optical efficiency of solar engineering Fresnel lenses[J]. *Applied Solar Energy*, 1989, **25**(6): 6~10
- 7 Li Peng, Wu Heli, Yang Peihuan *et al.*. General design method and optical efficiency of the solar concentrator by Fresnel lens[J]. *J. Wuhan University of Technology*, 2010, **32**(6): 62~66  
李鹏, 吴贺利, 杨培环等. 菲涅耳聚光透镜的一般设计方法及效率分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2010, **32**(6): 62~66
- 8 Guo Xiaowu. A general method for Fresnel lens design[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 1991, **12**(4): 424~426  
郭孝武. 菲涅耳透镜统一设计方法[J]. *太阳能学报*, 1991, **12**(4): 424~426
- 9 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540  
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光LED数学发光模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 10 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

栏目编辑: 韩峰