

# 阵列型紫外LED匀光照明系统设计

郝 剑<sup>1,2</sup> 荆 雷<sup>1\*</sup> 王 尧<sup>1,2</sup> 卢振武<sup>1</sup> 孙 强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为实现曝光系统均匀照明的目标,基于非成像光学,提出了一种阵列型模组的匀光照明系统优化设计方法。该方法首先通过对单模组的光学设计,实现半发散角度和阵列间距的初步计算,然后通过TracePro软件的Scheme宏语言和优化引擎相结合,实现对模组阵列间距的进一步优化,从而实现对整个光学系统的均匀照明设计。光源采用日亚紫外LED STS-DA1-2394E,阵列模组个数为5,阵列纵向间距为28 mm,横向间距为24 mm。该光学系统通过TracePro软件模拟仿真和实验结果表明:在距光源300 mm的距离处,可实现目标面积上的均匀照明,其非均匀性均小于5%,准直角度约为4°。

**关键词** 光学设计; 紫外曝光; 匀光照明; 阵列

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1022003

## Design of Uniform Illumination for Array LED

Hao Jian<sup>1,2</sup> Jing Lei<sup>1</sup> Wang Yao<sup>1,2</sup> Lu Zhenwu<sup>1</sup> Sun Qiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Opto-electronic technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To achieve the target of uniform illumination of exposure system, a design method of uniform lighting system with array module is proposed based on non-imaging optics. Firstly, through the design of single lens, the half divergence and the array distance are calculated roughly. Secondly, the Scheme macro language and the optimization engine in TracePro software are used in combination to achieve the optimization of the array distance. And then, the design of uniform illumination of entire optical system can be realized. In this paper, the STS-DA1-2394E (Cat.No.130319) UV LED of Nichia's is used as the light source, and the number of array module is 5. The array distance of lateral and vertical is respectively 28 mm and 24 mm. The results of simulation by TracePro software and experimental show that non-uniformity and collimation angle are less than 5% and 4° respectively, at a distance of 300 mm from the light source.

**Key words** optical design; ultraviolet exposure; uniform illumination; array

**OCIS codes** 220.4298; 230.3670; 220.2945

## 1 引言

随着高科技电子产品的应用越来越广泛,人们对其性能的要求亦越来越高,而作为其核心部件的印刷电路板(PCB)也愈发受到关注。紫外曝光机主要应用于PCB的线路板制造、半导体生产及高精度线路曝光。传统的紫外曝光光源通常选取的是高压球形汞灯<sup>[1-3]</sup>,其缺点为寿命短、体积大,易爆炸等。紫外激光器光刻

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家863计划(2015AA030102, 2013AA03A116)、中科院璀璨行动计划(KZCC-EW-102)

作者简介: 郝 剑(1988—),女,博士研究生,主要从事非成像光学设计和可靠性分析方面的研究。

E-mail: haojianjeneciome8@163.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事衍射光学、红外光学、光学系统设计、非成像光学和光学检测方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: 100jinglei100@163.com

光源,具有对光学设计要求高,价格高等特点,因此通常应用于高端的光刻设备<sup>[4-6]</sup>。而发光二极管LED作为新型照明光源,相比于前者,因其近似点光源发光、单色性好、寿命长、节能环保等优点,而被应用于诸多照明领域<sup>[7-8]</sup>,因此更适用作为曝光光源<sup>[9-10]</sup>。

均匀照明是保证曝光质量的一项重要技术<sup>[11]</sup>。随着光刻分辨率的不断提高,对光学系统实现照明均匀性的要求亦越来越高。实现均匀照明设计的方法主要可以概括为以下几种,利用柯勒照明原理、非球面和自由曲面透镜、积分棒和透镜阵列等。其中方法一系统元器件较多、过于复杂<sup>[12]</sup>,方法二设计的光学器件难于加工<sup>[13-14]</sup>,方法三<sup>[15-16]</sup>则较易限制照明最大孔径角,且由于光束在积分棒内多次反射,降低了能量利用率。目前对于实现大面积均匀照明的系统多采用方法四,然而阵列间距的准确选择成为此类照明设计的难点。

因此,本文基于方法四,针对日亚的一款紫外LED光源,结合采用理论公式计算和软件自动优化阵列间距的方式,提出了一种实现高均匀照明目标的光学优化设计方法。首先通过对单模组的光学设计实现小角度的发散,然后通过对多模组的阵列间距优化设计,实现目标面积上的均匀照明。通过光学软件模拟仿真和实验验证:在距光源 300 mm 处,照度面上的非均匀性均小于 5%。

## 2 设计原理及结构

### 2.1 光学结构

为简单说明问题,阵列模组的个数选为 5,大面积照明区域均可由该阵列模组拼接而成。光学系统结构如图 1 所示,由图可知,每一模组均是由 LED 光源、透镜和封装外框三部分组成。由 LED 光源发出的光线经过透镜进行汇聚后,再经过平板玻璃,投射在目标面上,5 个模组各自发出的光线叠加后即可实现照度面上的均匀照明。模组的阵列纵向间距  $d_1$  和横向  $d_0$  存在如下关系:

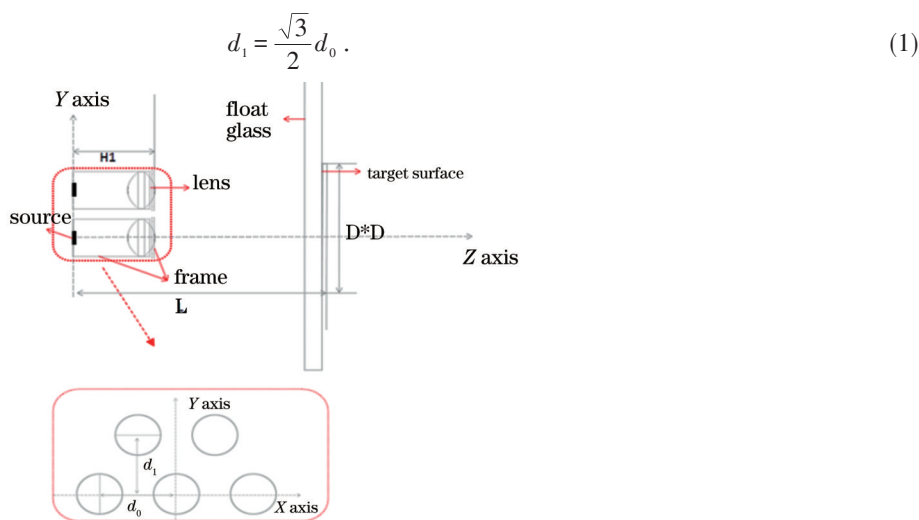


图 1 阵列系统的结构图

Fig.1 Array-lens structure

### 2.2 设计原理

照明系统的功能主要是对输出的光束进行匀光作用。每个模组单元在目标面上均独立产生一个近似圆形的照明光斑,通过光斑间的拼接叠加实现目标面上的均匀照明。

设 LED 光源的位置为  $A(x_0, y_0, 0)$  照度面上任意点的坐标为  $P(x, y, z)$ ,两颗 LED 模组叠加后  $P$  点照度的计算公式如下所示<sup>[17]</sup>:

$$E = z^m I_{LED} \left\{ \left[ (x - d_0/2)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} + \left[ (x + d_0/2)^2 + y^2 + z^2 \right]^{-(m+2)/2} \right\}, \quad (2)$$

其中,  $z$  为 LED 芯片到目标照度面的距离,  $I_{LED}$  是出射强度,  $d_0$  为 2 个 LED 的阵列横向间距。  $m$  为任意整数,其值由系统半视场角  $\theta_{0.5}$  决定,即:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{0.5})}. \quad (3)$$

当照度斜率最小时,有如下条件存在:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial^2 x} = 0, x = 0, y = 0, \quad (4)$$

结合(2)~(4)式,可得阵列间距为:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{m+3}} z. \quad (5)$$

为避免对光斑半径大小选择的误差及对半发散角的计算所引入的误差,基于TracePro软件,结合使用Scheme宏语言和优化引擎对计算的间距 $d_0$ 进行进一步的优化,进而确定最佳的阵列间距 $d'_0$ 。

### 3 仿真结果

#### 3.1 紫外LED光源的仿真

众所周知,LED光源仿真的准确与否直接决定着整个照明系统最终仿真结果的可靠性<sup>[18-21]</sup>。因此,首先需要对LED光源进行准确的建模。图2(a)、(b)为该紫外LED(型号为STS-DA1-2394E)制造商技术手册给出的光谱分布曲线和相对辐射强度曲线,图2(c)为追迹一百万光线得到的光强曲线模拟结果图,其中蓝,绿,红,浅蓝分别代表着空间光强在不同经度剖面的光强值,分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 剖面。选用TracePro光学软件对该款光源进行仿真模拟分析,其模拟结果与实际的LED光强曲线有着非常好的吻合,其归一化互相关值(NCC)<sup>[22]</sup>高达98.96%,从而验证了该紫光LED光源在光学软件里模拟的准确性。

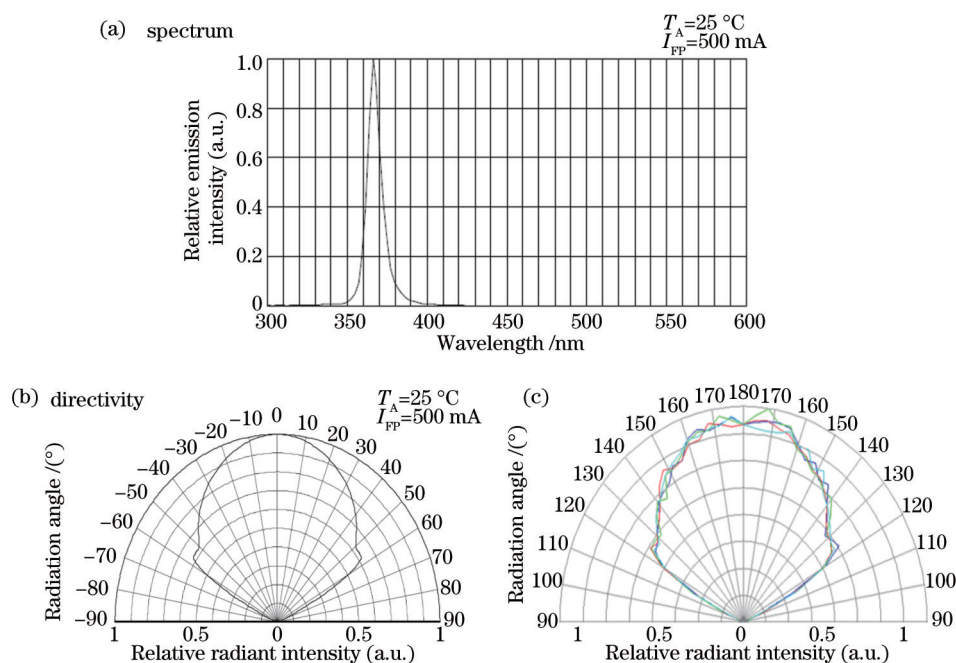


图2 光强曲线对比图。(a)实际光谱分布; (b)实际辐射强度分布图; (c)仿真模拟后的辐射强度分布图

Fig.2 Comparison of intensity curve. (a) Distribution of actual spectrum; (b) distribution of actual relative radiant intensity; (c) distribution of relative radiant intensity in simulation

#### 3.2 阵列间距的确定

表1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

| Semi-diameter /mm | H /mm | Radius /mm | Material | n     | z /mm |
|-------------------|-------|------------|----------|-------|-------|
| 12                | 54    | 15         | BK7      | 1.536 | 300   |

表1为单透镜设计的结构参数,如表所示,透镜为平凸透镜,开口半径为12 mm,高为54 mm,透镜材料选用于注塑成型的BK7,其折射率为 $n_2=1.536(\lambda=0.365 \mu\text{m})$ ,该透镜凸面曲率半径大小均为15 mm。

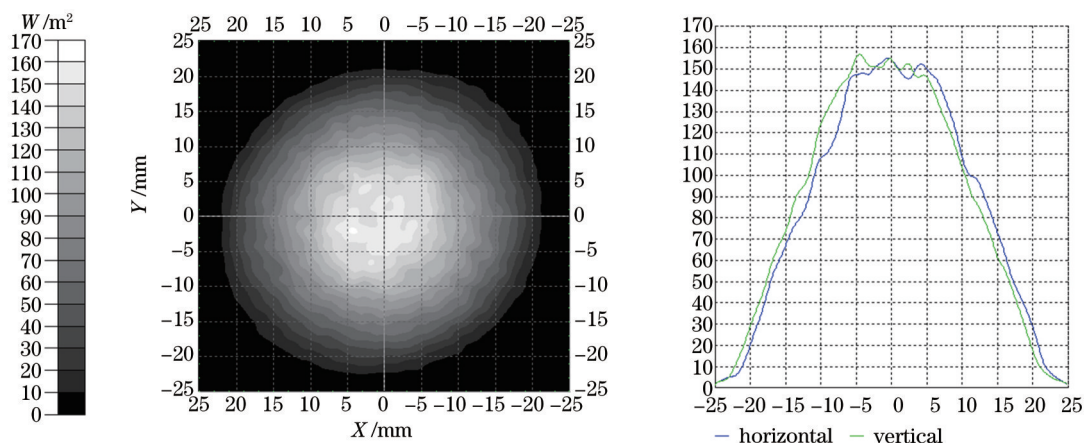


图3 单模组模拟后的照度分布图

Fig.3 Irradiance map of simulation for single module

图3为对单模组进行光线追迹<sup>[23]</sup>仿真模拟后的距光源300 mm照明目标面处的照度分布。由图可知,准直角度约为 $4^\circ$ 。并可计算半发散角

$$\theta_{0.5} = \arctan(15/300) \approx 3^\circ, \quad (6)$$

则根据(3)式可计算  $m$  值为

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos 3)} \approx 505, \quad (7)$$

已知  $z$  为 300 mm, 则代入(5)式可计算  $d_0$  为

$$d_0 = \sqrt{\frac{4}{505+3}} \times 300 \approx 27 \text{ mm}. \quad (8)$$

在此基础上,基于TracePro软件,结合使用Scheme宏语言和优化引擎对计算的横向间距  $d_0$  在  $\pm 2 \text{ mm}$  范围内进行进一步的优化,则可得最佳的阵列间距  $d'_0 \approx 28 \text{ mm}, d_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} d'_0 \approx 24 \text{ mm}$ 。

### 3.3 照明系统仿真

将照度非均匀性的定义为<sup>[24-25]</sup>

$$E_{\text{non-uniform}} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} \times 100\%. \quad (9)$$

按上述计算和优化的模组阵列间距大小,在TracePro软件中对系统进行光线追迹,评估距离光源300 mm处实现目标面上的均匀性。图4为优化前的照度分布,如图所示,  $X=0 \text{ mm}$  剖线处,即纵向,几乎无均匀性可言,

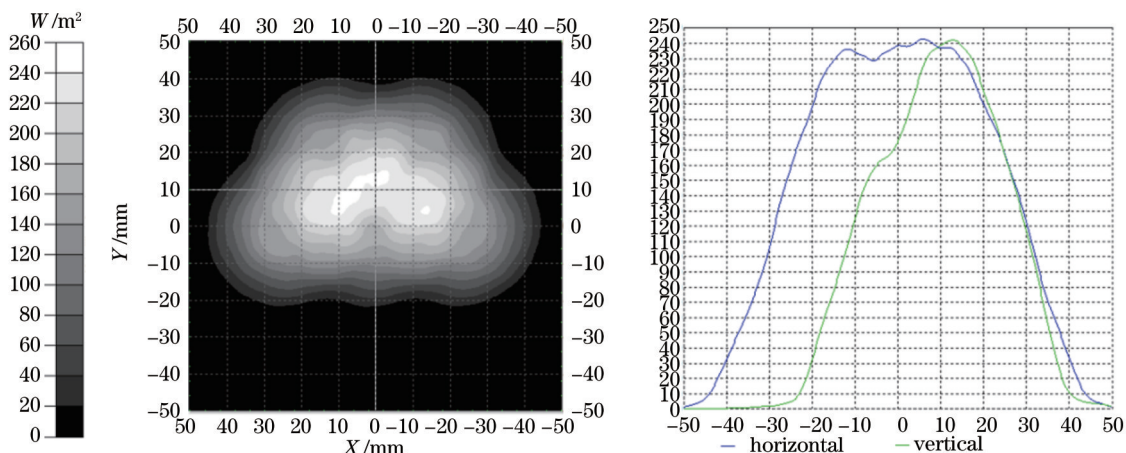


图4 优化前阵列模组仿真照度分布图

Fig.4 Irradiance map of simulation for array module before optimization

能量相对集中,如绿线所示;Y=10 mm 剖线处,即横向非均匀性为 $(242-220)/(242+220)=4.7\%$ ,可实现均匀宽度为36 mm,如蓝线所示。

优化后的照度分布如图5所示,可以看出,光斑的照度分布均匀,X=0 mm 剖线处,非均匀性为 $(120-109)/229=4.8\%$ ,可实现均匀宽度为35 mm,如绿线所示;Y=10 mm 剖线处,非均匀性为 $(117-110)/227=3.1\%$ ,可实现均匀宽度为50 mm,如蓝线所示。由上述模拟仿真结果可知,优化后的结果非均匀性较低,可实现很好的照明效果。

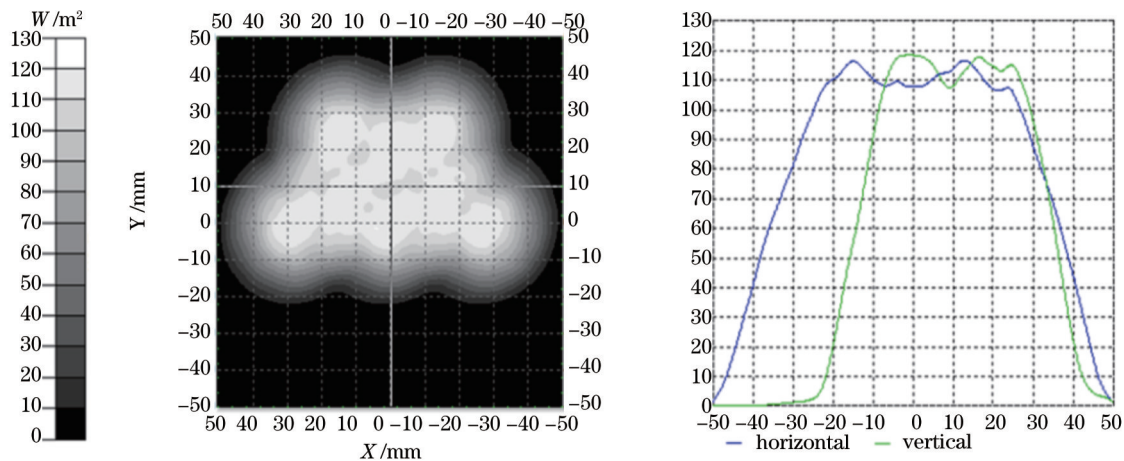


图5 优化后阵列模组仿真照度分布图

Fig.5 Irradiance map of simulation for array module after optimization

### 4 实验与结果分析

为了验证设计结果的准确性,搭建了如图6所示的实验平台。该实验平台主要由4部分组成,分别为恒流源①、透镜阵列模组②、支架③、平板玻璃④。其中对于恒流源①,设定的恒定电流为250 mA;对于透镜阵列模组②,按照设计的阵列间距对其排列。当5颗紫外LED光源通电后,由光源发出的光经过平凸透镜进行折射后,再经过平板玻璃④后,最终投射在照明目标面上。图7为目标面上照明光斑图。

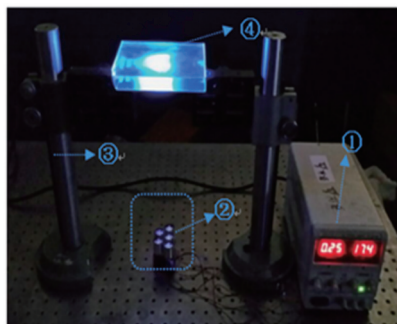
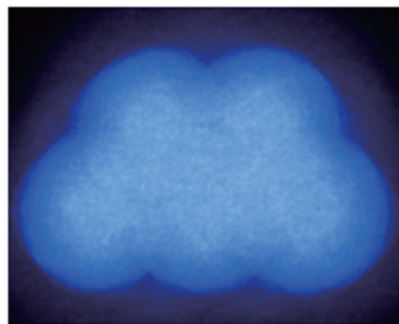


图6 实验平台图

Fig.6 Experiment platform



7 测试后的光斑图

Fig.7 Spot after experiment

选用照度探测器对接收面上的照度值进行相对测量,结果如图8所示,图8(a)为Y=10 mm(蓝绿线),X=0 mm(红线)处的相对照度分布图,(b)为Y=0 mm(蓝绿线),X=0 mm(红线)处的相对照度分布图,横轴的坐标均为cm,其中黑色短线代表测量不同位置时的照度值,由测得的数值可知,光斑的最大直径为10 cm左右,与模拟的结果基本一致。

表2为实现均匀照明面积上不同的坐标对应的照度值。由表2可知,图8(a)为X=0 mm和Y=10 mm方向的非均匀性分别为3.4%,5%;图8(b)为X=0和Y=0 mm方向的非均匀性分别为3.4%,3.7%;其中图8(a)的测试坐标同图5相同,由实验计算结果可知,测试的结果和模拟的结果基本保持一致,进而验证了模拟结果的准确性。

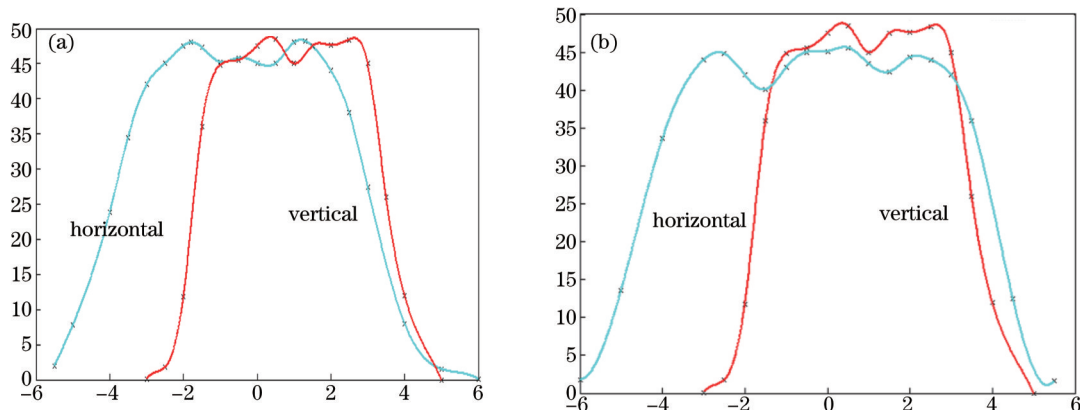


图 8 不同方向上的照度分布图。(a)  $X=0$  mm 和  $Y=10$  mm 方向; (b)  $X=0$  mm 和  $Y=0$  mm 方向

Fig.8 Irradiance distribution in different directions. (a) Direction of  $X=0$  mm and  $Y=10$  mm; (b) direction of  $X=0$  mm and  $Y=0$  mm

表 2 测量参数

Table 2 Measurement results

| Parameter | Illumination values under different coordinates $I/(W/m^2)$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Max  | Min | Uniform |      |      |      |
|-----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|---------|------|------|------|
| $X=0$     | Y   | -1   | -0.5 | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  | 2    | 2.5  | 3    |      |      |     |         |      |      |      |
|           | IV  | 44.9 | 45.5 | 47.5 | 48.1 | 45   | 47.5 | 45.8 | 47.9 | 45   |      |      |     |         | 48.1 | 44.9 | 3.4% |
| $Y=0$     | X   | -2   | -1.8 | -1.5 | -1   | -0.5 | 0    | 0.5  | 1    | 1.3  | 1.5  | 2    |     |         |      |      |      |
|           | IV  | 45   | 47.5 | 48   | 47.3 | 45.2 | 45.8 | 45.1 | 45   | 48.2 | 47.5 | 44.6 |     |         | 48.0 | 44.6 | 3.7% |
| $Y=0.1$   | X   | -3   | -2.5 | -2   | -1.5 | -1   | -0.5 | 0    | 0.5  | 1    | 1.5  | 2    | 2.5 | 3       |      |      |      |
|           | IV  | 44   | 44.4 | 42   | 40.8 | 43   | 44.6 | 44.7 | 45.1 | 43.5 | 42.4 | 44.3 | 44  | 42      | 45.1 | 40.8 | 5%   |

## 5 结 论

为了提高曝光机照明光学系统性能,基于非成像理论,提出了一种采用透镜模组阵列的方式实现匀光照明的方法。该设计方法考虑现有透镜阵列加工工艺,选择平凸透镜阵列作为匀光器件,模拟仿真的结果和实验测试的结果均验证,距离光源 300 mm 的目标面上可实现非均匀性小于 5%,准直角度约为  $4^\circ$  的照明效果,证实了该照明光学系统的可行性<sup>[6]</sup>。本文对改善曝光机照明性能,提高曝光产业生产效率具有一定的实际应用意义。

## 参 考 文 献

- Jiang Nianyun, Wang Yongru, Hou Desheng. High uniform violet ray illumination experimental device and its structure design[J]. Opto-Electronic Engineering, 1996, 23(1): 35-39.  
姜念云, 王永茹, 侯德胜. 紫光高均匀照明实验装置及结构设计[J]. 光电工程, 1996, 23(1): 35-39.
- Liu Pengfei, Yang Bo, Lu Kan. Design and research on the uniform illumination system of UV exposure machine[J]. Optical Instruments, 2012, 34(2): 31-36.  
刘鹏飞, 杨 波, 陆 侃. 紫外曝光机均匀照明系统的设计与研究[J]. 光学仪器, 2012, 34(2): 31-36.
- Zhou Chongxi, Lin Dajian, Li Zhan. Research of intensity distribution of uniform illumination system for optical photolithography[J]. Microfabrication Technology, 1996, 01: 23-28.  
周崇喜, 林大键, 李 展. 曝光均匀照明系统光照均匀性研究[J]. 微细加工技术, 1996, 01: 23-28.
- Li Fengyou. Study on Technology of Laser Direct Writing Photolithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002.  
李凤有. 激光直写光刻技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
- Shen Zhaoguo. Study on Laser of 532 nm Green and 355 nm UV by LD Pumped[D]. Xi'an: Northwest University, 2009.  
沈兆国. LD 泵浦 532 nm 绿光及 355 nm 紫外激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2009.
- Huang Zhimeng. Study on LD Side-Pumped All-Solid-State 266 nm Ultraviolet Laser[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.  
黄智蒙. LD 侧面泵浦全固态 266 nm 紫外激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.

- 7 Yan Wenping, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.*. LED street lamp lens with high energy efficiency utilization based on reverse optimization design[J]. *Acta Optical Sinica*, 2015, 35(4): 0422008.  
颜稳萍, 郭震宁, 林介本, 等. 基于逆向优化设计的高能量利用率LED路灯透镜[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422008.
- 8 Qian Keyuan, Hu Xiaojia. Study of the optical systems with illuminance and luminance uniformity simultaneously for LED lighting[J]. 2015, 35(2): 0208001.  
钱可元, 胡晓佳. 同时实现路面照度与亮度均匀性的LED光源光学系统研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0208001.
- 9 Li Jinchao. Study on Key Technologies in UV-LED Fiber Lithography System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.  
李金超. 紫外LED光纤光刻系统关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- 10 J Hahn, G Grabosch, L Parthier, *et al.*. Critical enabling properties of CaF<sub>2</sub> lens blanks for state of the art lithography tools[C]. SPIE, 2003, 50(40): 734-741.
- 11 W H Arnold. Towards 3 nm overlay and critical dimension uniformity: an integrated error budget for double patterning lithography[C]. SPIE, 2008, 6924: 692404.
- 12 Yao Hanmin, Hu Song. The Technology of Optical Projection Micro-Nano Processing[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006: 4-9.  
姚汉民, 胡松. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 4-9.
- 13 Li Mengyuan, Sun Jialue, Zhang Dawei, *et al.*. Optical system design for ultraviolet-LED curing based on the structure of freeform surface[J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, 34(12): 1222003.  
李梦远, 孙伽略, 张大伟, 等. 基于自由曲面透镜结构的紫外发光二极管固化系统光学设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222003.
- 14 Wang Guogui. Study and Design of Ultraviolet LED Lithography Light Source System[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013: 44-48.  
王国贵. 紫外LED光刻光源系统的研究与设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013: 44-48.
- 15 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Study of integrator rod in step and scan lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7): 981-985.  
郭立萍, 黄慧杰, 王向朝. 积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用[J]. *光子学报*, 2006, 35(7): 981-985.
- 16 T Bizjak, T Mitra, D Hauschild, *et al.*. Novel refractive optics enable multipole off-axis illumination[J]. SPIE, 2008, 6924: 69242J.
- 17 Allen Jong-Woei Whang, Yi-Yung Chen, Yuan-Ting Teng. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(3): 94-103.
- 18 Michael Bass, Eric W, Van Stryland, *et al.*. Handbook of Optics[M]. Washington: Optical Society of America Press, 1995: 1.121.14.
- 19 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.
- 20 Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1220011.  
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): 1220011.
- 21 Qian Keyuan. Near field optical modeling of LED and design optimization for direct-type backlight optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0522001.  
钱可元. LED近场光学模型与直下式背光源透镜的设计优化[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0522001.
- 22 C C Sun, T X Lee, S H Ma. Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(14): 2193-2195.
- 23 Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522003.  
辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角LED照明光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522003.
- 24 J Fruendt, M Jarczyński, T Mitra. Simultaneous multiple uniform spot generation with micro optics[C]. SPIE, 2008, 7062: 70620S.
- 25 T Bizjak, T Mitra, L Aschke. Novel high through put micro-optical beam shapers reduce the complexity of macro optics in hyper-NA illumination system[C]. SPIE, 2007, 6520: 65202X.