

doi:10.3788/gzxb20184704.0422002

# 紫外 LED 阵列匀光照明中失效安全设计

蔡文涛,尹韶云,向阳,孙秀辉,杜春雷,杨若夫

(重庆绿色智能技术研究院 集成光电技术中心,重庆 300417)

**摘 要:**为了弱化或消除 LED 失效对均匀性的影响,提出了一种基于复眼透镜的匀化光斑整体累加方案.该方案先对单颗 LED 进行匀化设计,再通过 LED 位置误差研究推广至 LED 阵列,实现每颗 LED 在曝光面上均能产生相同大小的匀化光斑.然后利用软件进行仿真,设计了一款曝光光源,并搭建了相应实验平台.该光源最大辐照度值为  $18.2 \text{ mW/cm}^2$ ,均匀性为  $86.9\%$ ,完全满足实际曝光指标.在此基础上采用遮挡光源的方式模拟不同位置的 LED 失效,进行了辐照度均匀性实验.结果表明,少量 LED 失效对辐照度均匀性的影响在  $1\%$  以内,甚至 LED 阵列接近一半失效时均匀性仅下降  $5\%$ .该设计方案可长期维持辐照度均匀性,更适用于实际生产.

**关键词:**紫外 LED;失效安全;光学设计;匀光照明;曝光

中图分类号:O435.1; TH741

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0422002-7

## Fail-safe Optimal Design of Uniform Illumination for UV-LED Array

CAI Wen-tao, YIN Shao-yun, SUN Xiu-hui, XIANG Yang, DU Chun-lei, YANG Ruo-fu  
(The Center of Integrated Optoelectronic technology, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 300417, China)

**Abstract:** For weakening or eliminating the effect on uniformity, the method of uniform light accumulation based on fly-eye lens was presented. At first, illumination uniformity is designed for one LED. Then the same uniform light spot can be generated on the target surface from every LED, according to the study of LED position error. Next, An exposure light source is designed by a simulation optimization software. The maximum illuminance is  $18.2 \text{ mW/cm}^2$  while the uniformity is  $86.9\%$ , which meeting the exposure requirements fully. At last, an experiment is made to test the illumination uniformity with the method of blocking LEDs. The result shows that a few invalid LEDs cause less than  $1\%$  decrease of uniformity. Even half of invalid LEDs lead to a result that uniformity declines by less than  $5\%$ . Thus, this method better suits actual manufacture than others by maintaining illumination uniformity for a long period.

**Key words:** UV-LED; Fail-safe; Optical design; Uniform illumination; Exposure

**OCIS Codes:** 220.2945; 220.4298; 230.3670; 140.7240; 080.4295

## 0 引言

印刷线路板的集成度及质量主要取决于紫外曝光机的性能.传统紫外曝光光源通常为高压汞灯<sup>[1-3]</sup>,该光源能耗大,维护成本高,启动时间长,寿命短且存在炸灯的风险,采用新型节能环保的紫外光源取代传统曝光光源势在必行.

近年来发光二极管(Light Emitting Diode, LED)因其节能、环保、寿命长、发热少等优点逐渐在各个领域取代了传统光源,相比于汞灯光源还具有即开即关等优势,更适合作为曝光光源<sup>[4-5]</sup>.随着曝光分辨率的

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.61475199,61605208)和重庆市重点产业共性关键技术创新专项(No. cstc2015zdcy-ztxx7006)资助

**第一作者:**蔡文涛(1990—),男,研究实习员,硕士,主要研究方向为 LED 照明与应用. Email:caiwentao@cigit.ac.cn

**通讯作者:**杨若夫(1980—),男,副研究员,博士,主要研究方向为精密机械设计与光电系统集成. Email:yang\_ruofu@163.com

**收稿日期:**2017-10-16; **录用日期:**2017-12-07

<http://www.photon.ac.cn>

要求越来越高,对光学系统技术指标如辐照度、辐照度均匀性、平行半角、光斑尺寸等的要求亦越来越高,其中平行半角和辐照度均匀性是保证曝光质量的关键<sup>[6-8]</sup>.目前单颗紫外 LED 发光功率极为有限,紫外 LED 曝光光源的实现方式通常采用透镜拼接的思想,即单个模块的灯珠只负责曝光面上一部分,通过多个模块拼接的方式来实现大面积匀化光斑<sup>[7,9-10]</sup>.然而 LED 芯片质量及批次的不同,可能存在辐照特性差异,且当其中某颗或多颗 LED 出现光衰或失效时,将直接影响曝光面的辐照度均匀性,进而影响曝光质量.为了减少上述现象的出现概率,可将 LED 阵列模块的颗数减少,采用光源扫描或曝光面板移动的方式实现均匀照明<sup>[2]</sup>.但这种方式不仅延长了曝光时间,还使得辐照度均匀性受到机械移动稳定性的限制,并不能有效解决因 LED 失效导致均匀性降低的问题.因此,以紫外 LED 阵列替代传统汞灯作为曝光光源,为弱化或消除 LED 失效对均匀性的影响,必须进行针对性的失效安全考虑,从原理上对匀光照明光学系统进行革新设计.

本文采用整体叠加的思路,基于双复眼透镜系统对单颗紫外 LED 进行光学设计,以满足除辐照度外的其他光学指标.然后推广至紫外 LED 阵列,实现每颗紫外 LED 在曝光面上能单独产生大小相近的匀化光斑.同时折叠光路,用于节省空间.最后利用软件仿真对 LED 阵列进行优化设计,并搭建了光路系统实验,对设计仿真结果进行验证.

## 1 匀光原理

### 1.1 单颗 LED 匀光原理

实现均匀照明的方法主要有以下几种,利用柯勒照明系统、衍射光学元件、非球面或自由曲面透镜、积分棒和复眼透镜阵列等<sup>[11-14]</sup>.其中柯勒照明系统元器件较多、过于复杂,难以达到大面积均匀照明的平行光要求.衍射光学元件的匀化效果受输入光强影响较大,需要针对特定的光源光强分布进行设计.积分棒为了获得较好的匀化效果需要牺牲能量利用率,使光束在积分棒内多次反射,且经匀化后的光线偏折角较大,不利于平行光设计.目前对于实现大面积均匀照明系统通常采用复眼透镜阵列的方法,该方法实现起来相对容易,且能量利用率高<sup>[15-16]</sup>.

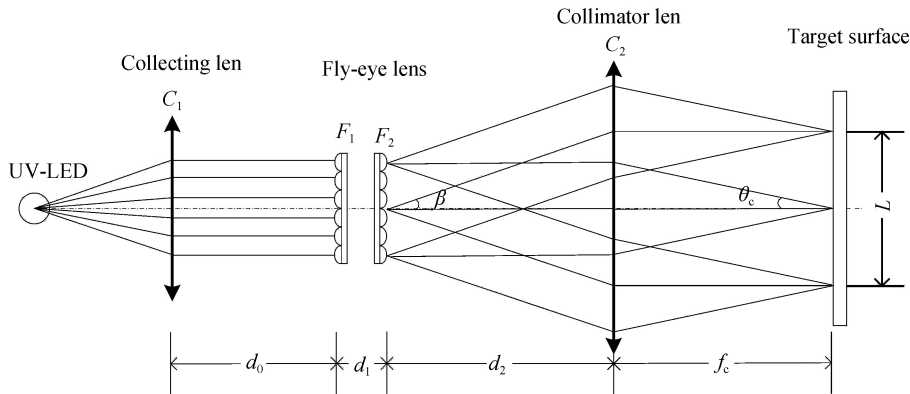


图1 单颗 LED 匀光光路

Fig.1 The uniform illumination system with one LED

复眼透镜匀光原理如图 1,利用每个小透镜把整个入射光束分裂为多个通道,每个通道的光束可单独照明整个目标面.多个通道的光束相互叠加,使得单通道光束的微小不均匀获得补偿,从而大大提高目标面上的辐照度均匀性.单颗 LED 发出的光束通常为朗伯体状,需要利用透镜汇聚之后再入射到复眼上.复眼由  $F_1$  和  $F_2$  两个透镜阵列组成,每个透镜阵列包含  $N$  个相同规格的球面子透镜.该子透镜的尺寸为  $p$ ,焦距为  $f_F$ .当透镜阵列  $F_1$  和  $F_2$  的距离  $d_1 = f_F$  时,入射光束经  $F_1$  每个子透镜成像于  $F_2$  上,并由  $F_2$  重叠成像于无穷远.可通过增加准直物镜,将每个子光束成像于曝光面即准直物镜的焦平面上.所有像在曝光面同一片区域叠加,使得该区域的能量均匀分布.此时匀化光斑的平行半角  $\theta_c$  和尺寸  $L$  为

$$\theta_c = \arctan\left(\frac{Np}{2f_c}\right) \quad (1)$$

$$L = pf_c \left( \frac{2}{f_F} - \frac{d_1}{f_F^2} \right) \quad (2)$$

为了将单路 LED 匀化光路推广至 LED 阵列,LED 聚光镜的孔径不宜过大.为了提高光能利用率,聚光镜需紧贴 LED 设计,所以该设计不能满足光源远场条件<sup>[17]</sup>.经聚光镜准直的光线必然存在一定发散角,该发散角由复眼透镜的最大接收角  $\alpha$  决定.如图 2 所示,当入射光线与光轴的夹角偏小时,光线通过透镜阵列  $F_1$  后并没有偏离对应  $F_2$  上子透镜.这时  $F_2$  焦平面上同一点发出的光线经  $F_2$  后将平行射出,对复眼后面光路毫无影响.当入射光线与光轴的夹角较大时,目标面上光斑将出现旁瓣<sup>[13]</sup>.假设  $d_1 = f_F$ ,复眼的最大接收角  $\alpha$  与最大出射角  $\beta$  相等,即

$$\alpha = \beta = \arctan\left(\frac{p}{2f_F}\right) \quad (3)$$

根据该最大接收角对紫外 LED 聚光镜进行优化,使能量利用率达到最优,该聚光镜的具体设计方法已在文献[18]中说明.目前曝光面尺寸  $L$  通常  $>500$  mm,而准直物镜尺寸大于曝光面尺寸.若采用透镜作为准直物镜,光路成本非常高,且光路结构异常庞大.在实际应用中可用反射式球面镜代替,最终单颗 LED 平行光系统如图 3 所示.单个 LED 聚光模块发出的光束需覆盖整个复眼孔径,才能充分发挥复眼的匀光特性,使得  $N$  个小光束经过光路后在曝光面上同一片区域叠加.

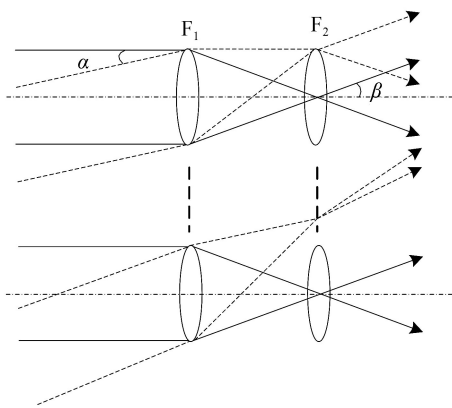


图 2 复眼的最大发射角和接收角

Fig.2 The maxemission and collection angle of fly-eye lens

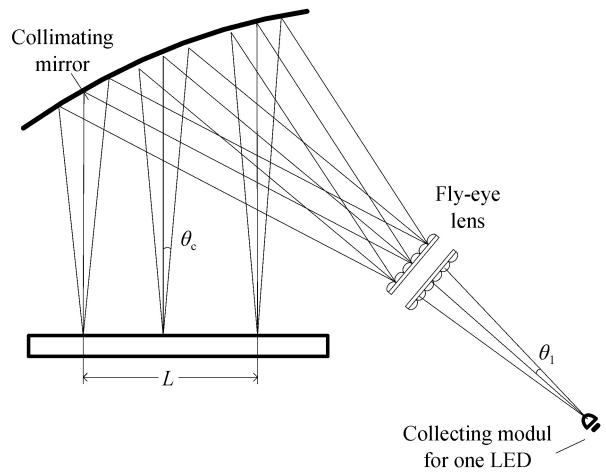


图 3 单颗 LED 平行光系统

Fig.3 The system of parallel light with one LED

## 1.2 LED 阵列匀光实现

为了保证均匀性可靠,LED 阵列光源可采用同样的方式实现平行光,即每个单独 LED 发出的光线经配光后能在曝光面上实现完整的均匀性光斑.在实际装配中 LED 位置会存在误差,该允许条件为 LED 聚光后的光束能在复眼最大接收角内覆盖到复眼合理范围,该误差的允许范围相当于 LED 阵列的排布空间.图 4

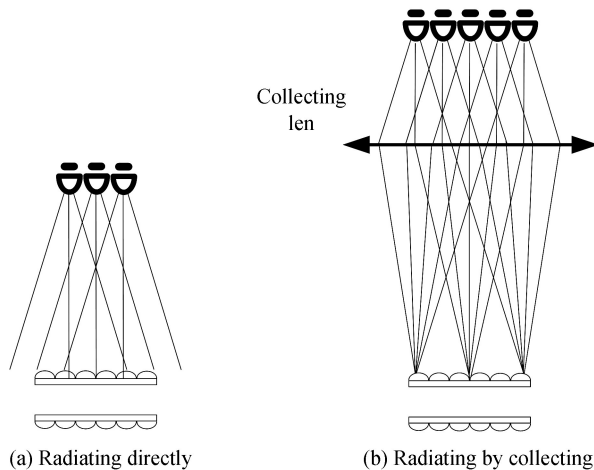


图 4 透镜排列方式

Fig.4 Two arrangements of LED lens

中显示了两种阵列方式,其中 a 型阵列的尺寸受限于复眼透镜的最大孔径,且边缘聚光小模块发出的大角度光线超出复眼范围,造成光能浪费. b 型阵列在 LED 阵列光源与复眼之间增加了一组焦距为  $f_{CL}$  的聚光镜,不仅增大了聚光小模块的排列空间,还将每个聚光小模块的光束完整地覆盖复眼,使得每个聚光小模块对曝光面的贡献具有独立性.其中结合式(2)和(3),可得 LED 阵列的最大排列空间为

$$l_{\max} = \frac{pf_{CL}}{f_F} \quad (4)$$

为了缩短光路结构,该聚光镜同样可由球面反射镜代替,最终光路如图 5.当 LED 阵列发生 LED

失效或老化不一致时,对于入射到复眼的光束仅仅改变的是光束的能量,而光束的最大入射角和覆盖复眼的尺寸保持不变,说明曝光面上光斑只有辐照度上的变化,从而保证了均匀性指标的可靠性.

## 2 仿真设计与分析

基于上述原理,结合蒙特卡洛光线追迹法对目前平行光曝光机用光源进行设计与仿真.为了保证线路板的质量与精度,实际应用要求曝光光源的平行半角 $\leq 2.5^\circ$ .同时为了满足生产量,要求曝光面上拥有足够辐照度,该值最低设计指标为  $16 \text{ mW/cm}^2$ .通常有效曝光面积为  $560 \text{ mm} \times 610 \text{ mm}$ ,在此区域内光斑辐照度均匀性需稳定在  $85\%$  及以上,该值在行业内定义为  $\eta = E_{\min}/E_{\max}$ ,即在有效曝光面内最小辐照度值除以最大辐照度值.

设计中采用的 LED 芯片辐射中心波长为  $365 \text{ nm}$ ,光谱半宽为  $10 \text{ nm}$ ,额定辐射功率为  $450 \text{ mW}$ ,发散角为  $\pm 60^\circ$ ,外形尺寸为  $6.8 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ ,发光面尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ .由于普通光学元件对紫外波段具有较强的吸收,光路中的反射镜需镀紫外高反膜,透镜选择熔融石英,以适当提高能量传递效率.

考虑到后工作距的需求,结合式(1)和(2),准直反射镜的尺寸初步定为  $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ ,曲率半径为  $3100 \text{ mm}$ .透镜阵列  $F_1$  和  $F_2$  皆由  $5 \times 6$  个子透镜组成,每个子透镜的尺寸为  $14 \text{ mm} \times 11.7 \text{ mm}$ ,焦距  $f_F = 29.5 \text{ mm}$ .由于实际现场的限制,聚光反射镜与复眼的距离不宜过大,取  $f_{CL} = 380 \text{ mm}$ ,根据式(4)可得 LED 阵列需限制在  $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$  的范围内.由于 LED 的光学扩展量已定,聚光小透镜的光学扩展量越大则能量利用率越高<sup>[12]</sup>.提高小透镜光学扩展量的方法,除了采用自由曲面等设计方法外,还可增加小透镜尺寸.在固定范围内排列的 LED 颗数随着小透镜尺寸变大而相应变少,所以 LED 阵列聚光模組的辐射总能量会经过先上升后下降的过程.以获取曝光面上平均辐照度值最大为目的,通过仿真优化,可得聚光部分为  $20 \times 20$  的 LED 阵列.此时曝光面光斑效果和中心辐照度分布曲线如图 6.

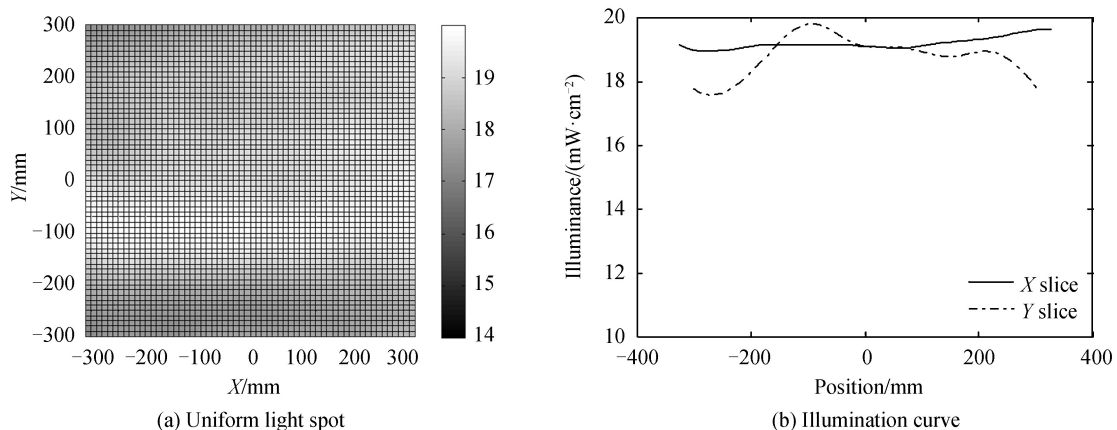


图 6 曝光面匀化光斑效果图

Fig.6 The uniform light spot on exposure surface by simulation

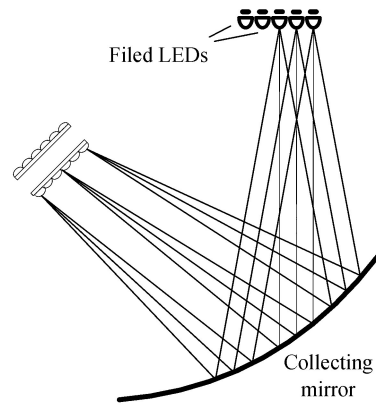


图 5 光线收集光路图

Fig.5 The diagram of collecting light

由仿真结果可知,在有效曝光面积内辐照度均匀性为 86.6%,平行半角为 1.3°,最大辐照度为 19.9 mW/cm<sup>2</sup>,均满足平行光曝光光源的要求.为了探讨 LED 失效问题,模拟中可通过遮挡光源来实现,并以图 7 中四种情况进行仿真.图中一个单元代表一个 2×2 的 LED 阵列,其仿真结果如表 1 所示.

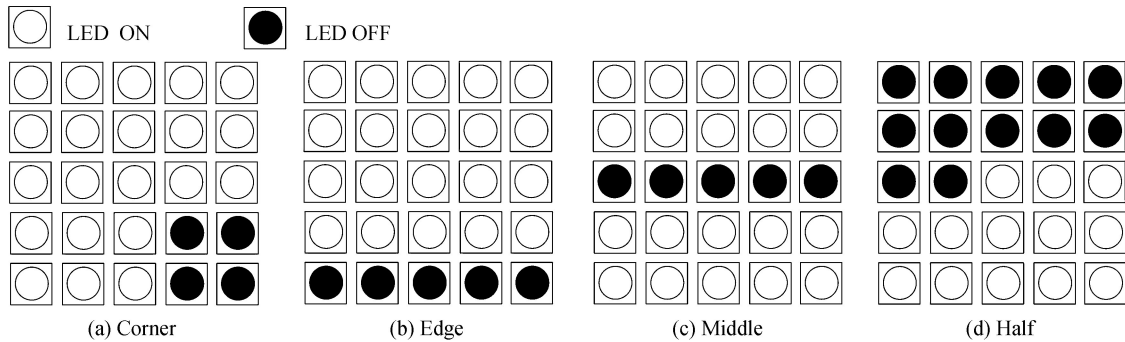


图 7 LED 失效示意图

Fig.7 The diagram of invalid LEDs

表 1 均匀性实验数据对比

Table 1 Data comparison of illumination uniformity

Items	Illuminance/(mW · cm <sup>-2</sup> )			Maximum illuminance/(mW · cm <sup>-2</sup> )	Experimental uniformity	Simulation uniformity
	1	2	3			
(a)	1	15.2	15.4	13.7	86.2%	86.6%
	2	15.7	15.6	14.7		
	3	15.0	14.8	13.5		
(b)	1	15.4	15.7	14.0	87.8%	86.6%
	2	15.8	15.8	14.4		
	3	15.6	15.4	13.9		
(c)	1	14.8	15.2	13.7	87.4%	86.6%
	2	15.0	15.4	14.2		
	3	14.3	14.9	13.4		
(d)	1	10.4	10.5	8.9	81.9%	73.8%
	2	10.7	10.4	9.2		
	3	10.1	9.8	8.8		

### 3 均匀性实验

为了验证实际光路中LED失效对曝光面均匀性的影响,搭建了如图8所示的实验平台.其中恒流源采

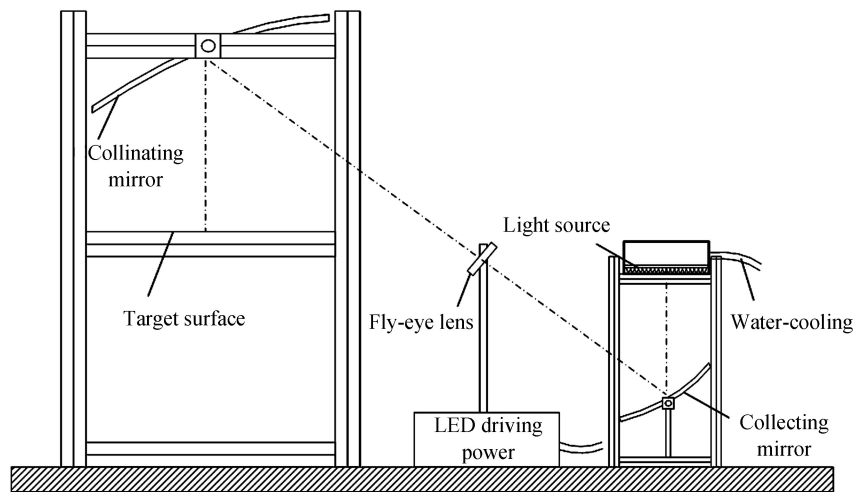


图 8 曝光实验平台

Fig.8 The experiment platform for exposure

用自主研发的 LED 驱动电源,最大恒流为 40A.目前大功率紫外 LED 芯片在正常工作时会产生大量热量,致使结温升高,进而影响发光效率.实验中采用水冷散热的方式,保证 LED 阵列的结温在 30℃ 以内.

根据式(2)可知,当透镜阵列间距  $d_1$  在两倍  $f_F$  以内时, $d_1$  越小,目标面的光斑尺寸  $L$  越大.由于总辐射能量不变,光斑最大辐照度值相应变小.因此准直反射镜、聚光反射镜和 LED 阵列光源固定好后,可通过调整透镜阵列间距,使得目标面上光斑各指标达到较优.该照明光斑如图 9(b)所示,其最大辐照度值为 18.2 mW/cm<sup>2</sup>,均匀性为 86.9%,与仿真结果基本保持一致.

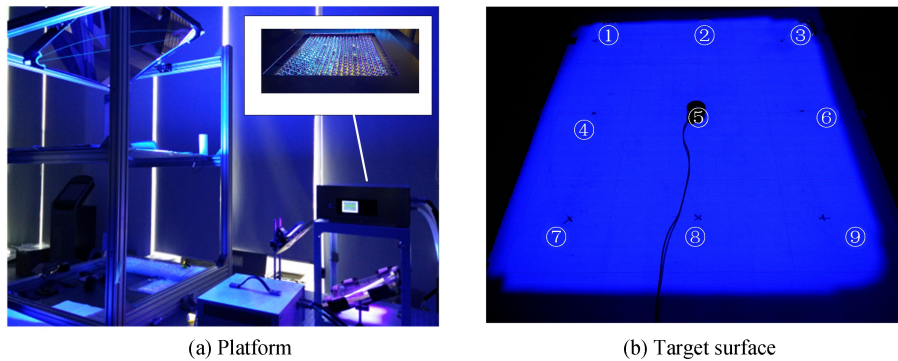


图 9 曝光面光斑

Fig.9 The uniform light spot on exposure surface by experiment

同样以图 7 四种情况模拟实际中 LED 失效问题,测量四种情况下曝光面的均匀性.均匀性测量通常采用 9 点测量,该 9 点分布在实际有效曝光面内,如图 9(b)所示.可得实际测试结果如表 1 所示.

结果表明,少量 LED 熄灭降低了目标面辐照度值大小,但对均匀性影响很小.即使出现一半 LED 熄灭且位置都偏向一边的极端情况时,均匀性仅下降了 5%.前三种均匀性情况与仿真结果基本保持一致,而(d)种情况的均匀性略高于仿真结果,是因为真实 LED 阵列中不可能存在绝对一致的聚光小模块,在光路调试中会存在位置偏差.

## 4 结论

为降低 LED 失效对受照面均匀性的影响,针对紫外 LED 阵列曝光光源的失效安全问题进行了光学系统设计,搭建了相应的曝光系统并进行了实验测量.模拟仿真和实验测试结果均表明,该系统的光学指标完全满足工业曝光需求.当出现个别 LED 失效时,少量 LED 失效对辐照度均匀性的影响可忽略不计.即使出现半边 LED 阵列不亮时,均匀性仅下降 5%,从而验证了该光学系统在可靠性保障方面的有效性.

### 参考文献

- [1] LIU Peng-fei, 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.
- [2] HAN Qiu-yi, JING Zhong, ZHANG Shan-duan, Novel mobile UV-LED curing apparatus[J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2014, **35**(9): 43-48.  
韩秋漪, 荆忠, 张善端. 新型移动式 LED 紫外固化设备[J]. 涂料技术与文摘, 2014, **35**(9): 43-48.
- [3] ZHAO Xin-cai, WU Yun-feng, XIE Yu, et al. Uniformity simulation and research based on PCB exposure machine illuminating system[J]. *Optical Instruments*, 2010, **32**(4): 52-56.  
赵新才, 吴云峰, 谢煜, 等. PCB 曝光机照明系统的均匀性仿真与研究[J]. 光学仪器, 2010, **32**(4): 52-56.
- [4] MURAT K, ILYAS F. UV-LED exposure system for low-cost photolithography[C]. SPIE, 2014, **9052**: 90521T-7.
- [5] STOWE R. Comparing traditional UV systems with LED UV systems for UV curing[C]. AIMCAL Web Coating & Handing Conference USA, 2014.
- [6] WANG Xiang-xian, WANG Bo, FU Qiang, et al. Design of uniform illumination optical source with 365nm LED and application in lithography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(4): 0416001.  
王向贤, 汪波, 傅强, 等. 均匀辐照 365 nm LED 光源设计及其在光刻中的应用[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0416001.
- [7] HAO Jian, JING Lei, WANG Yao, et al. Design of uniform illumination for array LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(10): 1022003.  
郝剑, 荆雷, 王尧, 等. 阵列型紫外 LED 匀光照明系统设计[J]. 光学学报, 2015, **35**(10): 1022003.
- [8] BAO Xing-zhen, LIANG Jing-qiu, LIANG Zhong-zhu, et al. Current density and irradiance distribution of light-

- emitting-diode-array device with divided pixels[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(11): 1399-1407.  
包兴臻, 梁静秋, 梁中翥, 等. 像素分割对 LED 电流密度及光照度分布的影响[J]. *发光学报*, 2016, 37(11): 1399-1407.
- [9] LU Yong-jun, XU Wen-hai, ZHAO Huan, *et al.* Design a single spot UV-curing system with two-dimensional UV-LED array[J]. *Journal of 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固化系统的设计[J]. *应用光学*, 2009, **30**(1): 16-19.
- [10] CHEN Y, PAN C, YANG T, *et al.* Study of freeform lens for UV-LEDs exposure system with reflector for uniform irradiance[C]. *IEEE International Conference on Nano/micro Engineered & Molecular Systems*, 2015.
- [11] MENG Xiang-xiang, LIU Wei-qi, FENG Rui, *et al.* Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0822003.  
孟翔翔, 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.
- [12] LI Peng, ZHEN Yi, FAN Jiang-bing, *et al.* Design of squared uniform illumination based on high power LED extended objects[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 0222001.  
李鹏, 郑毅, 范江兵, 等. 基于大功率 LED 扩展光源的均匀光斑光辐射模拟器设计[J]. *光子学报*, 2015, **44**(2): 0222001.
- [13] JIA Wen-wu, WANG Yue-feng, HUANG Feng, *et al.* Application of fly's eye lens in beam shaping laser diode array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(2): 0202008.  
贾文武, 汪岳峰, 黄峰, 等. 复眼透镜在激光二极管阵列光束整形中的应用[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202008.
- [14] CIOU F, CHEN Y. Investigation of uniformity field generated from freeform lens with UV LED exposure system[C]. *SPIE*, 2015, **9383**: 93830S.
- [15] WANG Pei-pei, YANG Xi-bin, ZHU Jian-feng, *et al.* Design and analysis on large area uniform illumination with fly-eye lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, **35**(5): 771-778.  
王沛沛, 杨西斌, 朱剑锋, 等. 基于复眼透镜的大面积均匀照明方案研究[J]. *应用光学*, 2014, **35**(5): 771-778.
- [16] LIU Hong, WANG Wei-sheng, ZHENG Jian. Design of fly-eye lens for laser display[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(8): 089002.  
刘红, 王蔚生, 郑健. 激光显示照明光路中复眼透镜的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2014, **26**(8): 089002.
- [17] LIU Xian-ming, CAI Wen-tao, LEI Xiao-hua, *et al.* Far-field distance for surface light source with different luminous area[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(8): 1629-1635.
- [18] GUI Li, SUN Xiu-hui, YIN Shao-yun, *et al.* Modeling error analysis and compensation design for free-form uniform illumination lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(10): 1022008.  
桂立, 孙秀辉, 尹韶云, 等. 自由曲面匀光透镜的建模误差分析及补偿设计[J]. *光学学报*, 2015, **35**(10): 1022008.