

大面积高均匀度平行光曝光机用自由曲面复眼透镜设计

陈忠雨^{1,2}, 尹韶云¹, 孙秀辉¹, 江海波¹, 杜春雷¹

¹中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电技术研究中心, 重庆 400714;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 大面积平行光曝光机是印刷电路板(PCB)、显示面板和触摸屏等电子产品重要的制造设备,由于采用复眼结合反射镜的非轴对称科勒照明光路,其曝光均匀度只有 0.85 左右,难以满足高精度加工制造的需求。针对此问题,提出了采用自由曲面复眼替代传统的球面复眼,建立了高均匀度复眼单元的自由曲面面型设计方法。光线追迹仿真实验结果显示,采用所提方法后曝光均匀度提高到了 0.91 以上,满足高精度加工制造所需的高曝光均匀度的要求。所设计的自由曲面复眼的面型连续,可以通过金刚石车削进行精密加工,有望在大面积平行光曝光机照明光路中得到广泛应用。

关键词 光学设计; 高均匀度; 自由曲面; 曝光机; 复眼透镜

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.042201

Design of Fly-Eye Lens with Free-Form Surface Used in Parallel Light Exposure Machine with Large Area and High Uniformity

Chen Zhongyu^{1,2}, Yin Shaoyun¹, Sun Xiuhui¹, Jiang Haibo¹, Du Chunlei¹

¹Integrated Optoelectronic Technology Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Parallel light exposure machine with large area is an important manufacturing equipment for electronic products such as printed circuit board (PCB), display panel, touch screen, and so on. Due to the use of non-axisymmetric Kohler illumination light path with fly-eye lens and a mirror, the uniformity of the exposure machine is only about 0.85, which cannot meet the needs of high-precision machining. Aiming at this problem, a fly-eye lens with free-form surface is proposed to replace traditional spherical fly-eye lens, and a free-form surface design method of high-uniformity fly-eye unit is established. The experimental results of ray tracing simulation analysis show that the exposure uniformity is improved to more than 0.91 by using the proposed method, which can meet the needs of high-precision machining. The designed fly-eye lens with free-form surface, which has continuous surface and can be machined by diamond turning, is expected to be widely used in the illumination path of parallel light exposure machine with large area.

Key words optical design; high uniformity; free-form surface; exposure machine; fly-eye lens

OCIS codes 220.4298; 080.2740; 200.4740; 120.3620

1 引言

近年来,随着人们对智能手机、平板电脑、微投影仪等电子信息产品的性能要求不断提高,对作为

其核心部件的印刷电路板(PCB)、显示面板、触摸屏等电子产品的加工精度的要求也越来越高^[1-3]。曝光机是目前制造这些产品必不可少的设备,它完成制造工艺中的图形转移工艺步骤。产品的质量、精

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61605208)

作者简介: 陈忠雨(1992—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: chenzhongyu@cigit.ac.cn

导师简介: 杜春雷(1962—),女,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学及微光学应用等方面的研究。

E-mail: cldu@cigit.ac.cn(通信联系人)

度等问题很大程度上取决于曝光质量,而曝光质量又取决于在有效曝光面积内紫外线的平行度与能量均匀度^[4-6]。例如对于 PCB 和高分辨率玻璃基板的加工,光照度均匀度达到 0.9 以上才能确保物件经曝光后获得较好的图像转移效果^[7-8]。

然而目前广泛使用的曝光机采用复眼结合反射镜的非轴对称科勒照明光路,因此导致其照明光斑均匀性不够好。本文主要针对这一问题,通过使用自由曲面透镜阵列代替传统复眼透镜来解决非对称结构的影响问题,从而提高照明面光照均匀性。

2 曝光机光学系统

紫外平行光曝光机的光学系统主要由光源、集光器、冷光镜、匀光系统、二向色镜和球面反射镜组成,如图 1(a)所示。光源发出的光经准直后,再由冷光镜反射到达匀光系统,出射的光再通过二向色镜,然后由上下球面反射镜分别准直反射到晒板上,对待加工板材进行曝光。其中匀光系统主要有复眼匀光系统和方棒匀光系统,由于复眼系统相对于方棒系统而言具有能量利用率高、能提高整体结构的紧凑性及降低加工成本等优势,因此现有曝光机一般采用复眼匀光系统^[9-10]。

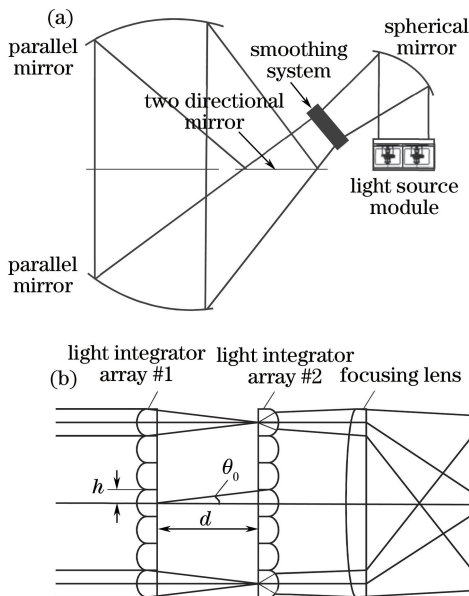


图 1 (a)曝光机光学系统;(b)复眼透镜匀光原理

Fig. 1 (a) Optical system of exposure machine;

(b) smoothing principle of fly-eye lens

复眼系统由前后两排完全相同的微透镜阵列构成,间隔距离为小透镜的焦距 f ^[11-12],其匀光原理如图 1(b)所示。图 1(b)中 h 为小透镜的半口径, d 为

两排小透镜之间的间隔距离。当光束照到第一块透镜后被聚焦到第二块复眼透镜的中心,即光源被多个小透镜成像于第二块透镜中的每个小透镜的中心位置,然后出射到达照明面。第一块复眼透镜中的每个小透镜相当于一个光通道,每个通道内的光束独立地照明目标平面,照明面的光斑是每个通道照明光束的叠加。结果每个通道光束内的细小的不均匀性因为光束的对称叠加而优化,整个孔径内的出射光均匀性得到很大改善^[13-15]。由于复眼一般具有方形孔径,所以目标面光斑也是方形光斑^[16]。复眼接收角 $\theta_0 = \arctan(h/d)$,入射光入射角必须小于 θ_0 才能得到均匀性较好的光斑。

相对于传统复眼系统,在曝光机匀光系统中,积分透镜变成了离轴球面反射镜。这使得每个通道内的光束是不对称的叠加,影响了照明面光斑的均匀性。如图 2 所示,当积分透镜变成离轴球面反射镜后,目标面光斑呈中间强、边缘弱的趋势,均匀性降低。这种影响体现为使用球面反射镜后,照明光斑均匀性对复眼出射光的能量分布更敏感。由于复眼对小角度入射光的像差较小,所以小角度入射光最终形成的光斑均匀性优于大角度入射光。如图 3 所示,小角度(如 0°)入射光在目标面形成的照明光斑均匀性较好,而大角度(如 14°)的光主要照射目标面的中心区域;所以当各种角度的入射光同时入射时,最终的光斑会呈现中间强、边缘弱的趋势。经过测试发现,在现有的曝光机中,照明面光斑的均匀性为 0.85 左右,例如志圣 UVE-M525 曝光机的均匀性为 0.85、川宝 E2100-5KAC 曝光机的均匀性为 0.86、科视 KST-10075-XL 曝光机的均匀性为 0.85、维科盛泰 VP850 曝光机的均匀性为 0.85。针对这一问题,要想改善照明面光斑均匀性,需要使复眼出射光达到特定的分布。由于复眼只有两排透镜阵列,如果只是优化复眼本身的参数,很难达到目的;考虑到自由曲面具有准确控制光束分布的特点^[17-18],通过将自由曲面引入复眼,可以使出射光束达到所需的分布。因此,提出了一种基于自由曲面的透镜阵列来解决曝光机目标面光斑均匀性问题的设计方法。

3 设计方法

复眼每个通道接收到的光均为具有一定发散角且在各个角度内均匀分布的光。所以,整个光路模型就简化成光源发出的光经过复眼透镜,再经过球面反射镜到达照明面进行照明,如图 4 所示。本研

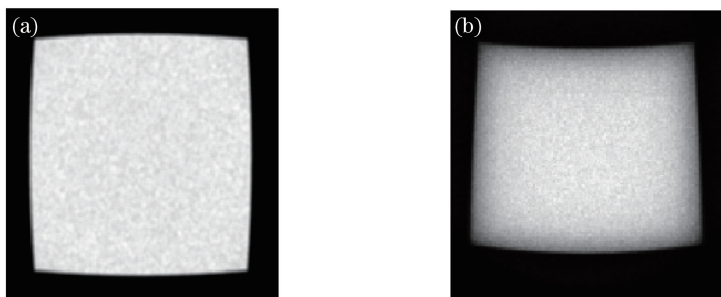


图2 积分透镜分别为(a)透镜和(b)球面反射镜时的目标面光斑

Fig. 2 Target surface spot when the integrator is (a) lens and (b) spherical mirror, respectively

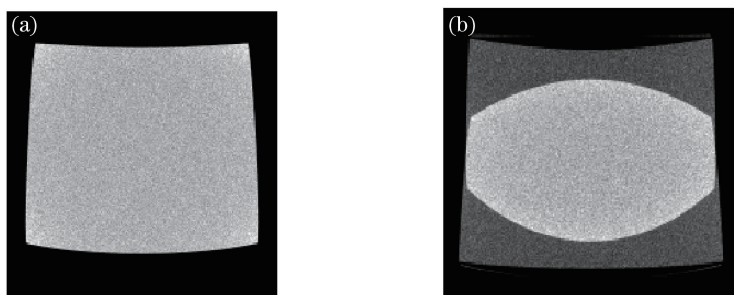


图3 单一角度平行光入射时的目标面光斑。(a) 0°; (b) 14°

Fig. 3 Target surface spot with parallel light incidence at single angle. (a) 0°; (b) 14°

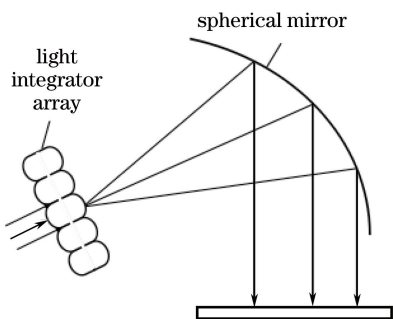


图4 曝光机光路示意图

Fig. 4 Light path diagram of exposure machine

究的目标就是设计一种自由曲面来代替复眼球面,使得照明面光斑更均匀。

3.1 球面反射镜前光束的强度分布

为了达到目的,首先需要计算球面反射镜前的光束具有怎样的强度分布才能在照明面得到均匀光斑^[19]。由于要计算能使照明面光斑均匀度达到1的光束分布很困难,同时考虑到复眼出射光是一束锥形光束,所以本研究首先计算了均匀分布的锥形光束(各个方向上光线的光强一样)经过球面反射镜后目标面光斑的均匀性。光斑均匀性^[20]定义为:

$$\eta = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}, \quad (1)$$

式中 E_{\max} 和 E_{\min} 分别表示目标面光强的最大值和最小值。结果发现,光束发散角为 10° 时,目标面照明光斑均匀性达到 0.95 左右,面积与所需面积相符,如图 5 所示;另外,当以 20 mm 为间隔移动光束中心时,目标面光斑均匀性基本保持稳定,如表 1 所示。表 1 中,Position 表示光束中心在经过光束中心且垂直于中心光线的平面内的位置。所以球面反射镜的入射光束的强度呈均匀分布即为所需,即当经复眼出射的光束的强度满足均匀分布时,目标面照明光斑均匀性能满足要求。综上所述,整个设计思路为:入射光经过自由曲面透镜,出射光强度呈锥形均匀分布。

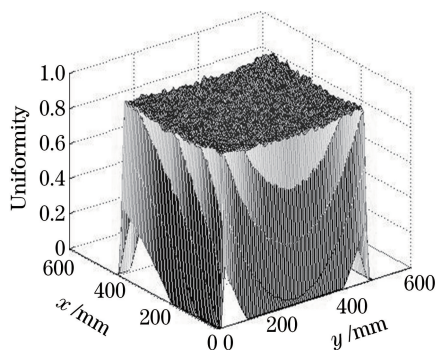


图5 目标面光斑的照度分布

Fig. 5 Illuminance distribution of target surface spot

表1 目标面光斑均匀度与光束中心的变化关系

Table 1 Relationship change between uniformity of target surface spot and beam center

Position	Uniformity	Position	Uniformity	Position	Uniformity	Position	Uniformity	Position	Uniformity
(-40, -40)	0.9568	(-20, -40)	0.9551	(0, -40)	0.9610	(20, -40)	0.9623	(40, -40)	0.9598
(-40, -20)	0.9609	(-20, -20)	0.9614	(0, -20)	0.9588	(20, -20)	0.9668	(40, -20)	0.9652
(-40, 0)	0.9608	(-20, 0)	0.9619	(0, 0)	0.9574	(20, 0)	0.9595	(40, 0)	0.9593
(-40, 20)	0.9623	(-20, 20)	0.9575	(0, 20)	0.9590	(20, 20)	0.9616	(40, 20)	0.9548
(-40, 40)	0.9643	(-20, 40)	0.9609	(0, 40)	0.9613	(20, 40)	0.9552	(40, 40)	0.9557

3.2 设计步骤

光线矢量关系示意图如图6所示。图中, h 表示球面的最高点, $-h$ 表示球面的最低点, 光轴位置处 h 为0。 \mathbf{I} 为自由曲面入射光线单位向量, \mathbf{O} 为出射光线单位向量。通过上述分析可知, 入射光为平行光且以 θ 角度入射, θ 取值范围为 $0^\circ \sim 14^\circ$, 14° 为复眼最大接收角。显然, θ 越大, 光线与自由曲面的交点越偏离光轴; θ 一定时, 从上至下的入射光线经球面折射后与曲面的交点从上而下依次排列, 已知自由曲面出射光线, 可以求得这些点。改变 θ , 可以求出一系列自由曲面上的点。由于所求曲面具有旋转对称结构, 因此只需求出二维的自由曲线, 再将自由曲线旋转即可得到最终的自由曲面。

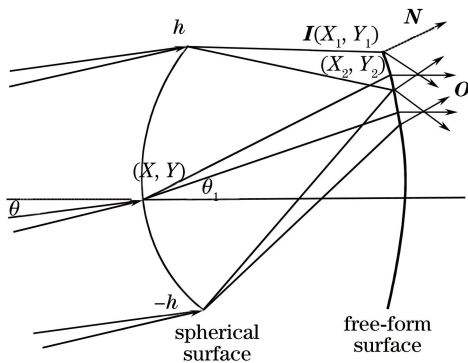


图6 光线及矢量关系示意图

Fig. 6 Sketch diagram of light and vector relation

首先针对入射角最大的平行光进行分析, 入射光经过第一球面偏折后, 再经过第二曲面出射。已知入射角和球面半径, 可以求出每条光线经球面折射后的出射光线。其中在 $0 \sim h$ 范围内出射光与光轴的夹角 θ_1 为:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{Y}{R-X}\right) - \arcsin\left\{\frac{\sin[\arctan(Y/R-X) - \theta]}{n}\right\}, \quad (2)$$

式中 R 为球面半径, n 为介质折射率。

在 $-h \sim 0$ 范围内出射光与光轴的夹角 θ'_1 为:

$$\theta'_1 = -\arctan\left(\frac{Y}{R-X}\right) +$$

$$\arcsin\left\{\frac{\sin[\arctan(Y/R-X) - \theta]}{n}\right\}. \quad (3)$$

至此, 得到了入射到自由曲面的光线, 再结合所需的自由曲面出射光线的分布, 根据斯内尔定律^[21-22]可以求得每条入射光线在自由曲面上对应点的法线向量。以出射光与光轴的夹角在 $0 \sim h$ 范围内为例, 折射定律表达式为:

$$\mathbf{O} - n \cdot \mathbf{I} = [1 + n^2 - 2n \cdot (\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \cdot \mathbf{N}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{I} = (\cos \theta_1, \sin \theta_1)$, $\mathbf{O} = (\cos \theta_2, \sin \theta_2)$, $\mathbf{N} = (N_x, N_y)$; θ_2 为自由曲面出射光线与光轴的夹角。根据上式可以得到:

$$\frac{N_x}{N_y} = \frac{\cos \theta_2 - n \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_2 - n \cdot \sin \theta_1} = k. \quad (5)$$

选取初始点 (X_1, Y_1) , 结合在点 (X_1, Y_1) 处的法向量 \mathbf{N} , 根据向量 $(X_2 - X_1, Y_2 - Y_1)$ 与向量 \mathbf{N} 垂直, 求出曲面上靠近 (X_1, Y_1) 的点 (X_2, Y_2) 满足的关系:

$$Y_2 = \frac{(X_1 - X_2) \cdot N_x}{N_y} + Y_1. \quad (6)$$

曲面上每个点 (X_2, Y_2) 都对应着球面上的一个点 (X, Y) , 由几何关系可以得到:

$$\tan \theta_1 = \frac{Y_2 - Y}{X_2 - X}. \quad (7)$$

联立(5)~(7)式可得:

$$X_2 = \frac{Y_1 + X_1 \cdot k + X \cdot \tan \theta_1 - Y}{k + \tan \theta_1}, \quad (8)$$

$$Y_2 = \tan \theta_1 \cdot (X_2 - X) + Y, \quad (9)$$

由此即可求出点 (X_2, Y_2) , 将 (X_2, Y_2) 作为初始点依次迭代计算得到整个曲线上的点。再将这些点连起来形成一条曲线, 最后将得到的曲线旋转就可以得到最终的自由曲面。

4 仿真实验部分

将以上设计方法用 Matlab 软件编程计算, 得到的点导入 3D 建模软件 Rhino 绘制成自由曲线, 再通过软件自带的旋转工具 Revolve 将曲线绕 z 轴旋转 360° 得到所需的自由曲面。然后将得到的透镜

做成阵列,并将透镜模型建成实体文件,如图7所示。最后将自由曲面透镜实体文件导入光学仿真软件进行光线追迹。光学系统各元件参数为:传统复眼透镜阵列为 5×5 ,单通道孔径为14 mm,曲率半径为28 mm;自由曲面复眼透镜阵列为 5×5 ,单通道孔径为14 mm,第一面曲率半径为20.337 mm;透镜折射率 $n = 1.4584$;球面反射镜曲率半径为3100 mm。模拟计算了800万条光线,仿真结果如图8和图9所示。

两种情况下均在目标照明面(1000 mm ×

1000 mm)上取560 mm × 610 mm大小的光斑进行分析。其中使用传统复眼透镜时,光斑的均匀度为0.857,能量利用率为0.78;而使用自由曲面透镜阵列时,光斑的均匀度为0.912,能量利用率为0.76。通过比较可以发现,使用所设计的自由曲面透镜阵列在保持能量利用率基本不变的情况下,能使照明面光斑均匀性得到有效提高。同时,所得自由曲面的连续性很好,曲面变化较为平缓,矢高为3.063 mm,其数据可以由软件直接导出,并通过金刚石车削进行精密加工。

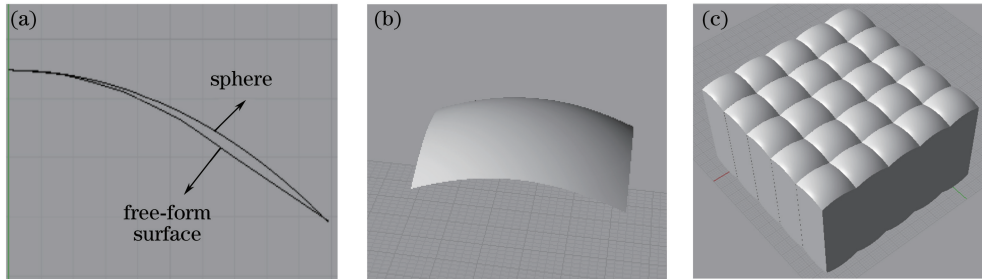


图7 (a)自由曲面与球面轮廓线;(b)自由曲面示意图;(c)自由曲面透镜阵列模型

Fig. 7 (a) Contour lines of free-form surface and sphere; (b) schematic diagram of free-form surface; (c) free-form surface lens array model

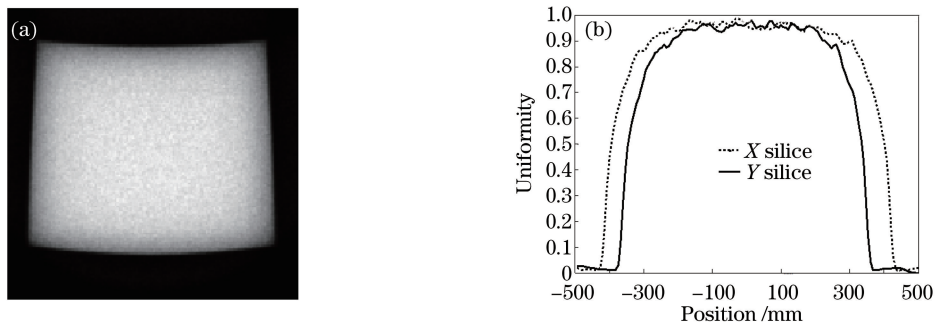


图8 使用传统复眼透镜得到的目标面的(a)光斑及(b)照度分布曲线

Fig. 8 (a) Spot and (b) illuminance distribution curve of target surface with traditional fly-eye lens

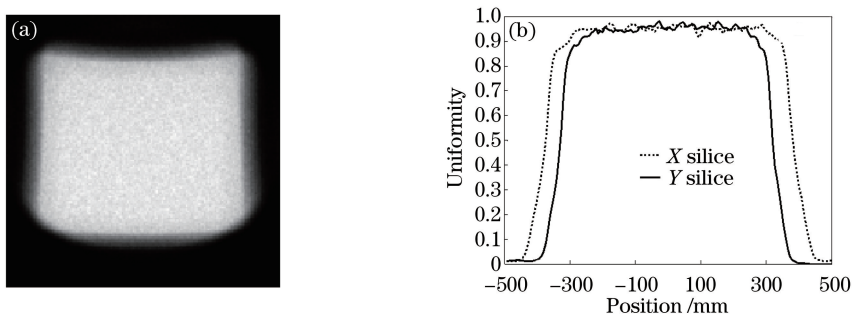


图9 使用自由曲面复眼透镜得到的目标面的(a)光斑及(b)照度分布曲线

Fig. 9 (a) Spot and (b) illuminance distribution curve of target surface with free-form surface fly-eye lens

进一步分析可以发现,图9所示的光斑均匀度满足实际要求,但仍低于理论值0.95。这主要是因为自由曲面面型需要由不同角度的入射平行光计算得出,所以设计时自由曲面与球面的距离不能等于球面焦距。这样由于入射角度连续,会不可避免地造成相邻角度入射光线的部分重叠,即计算出来的面型对部分重叠的入射光线不能实现精准控制。其次,由于多次迭代计算产生的误差以及建模产生的误差也会对光斑均匀性造成一定影响。后续有望从改进面型计算方法以及提高设计理论值等方面继续改善该设计。

5 结 论

针对大面积平行光曝光机照明面光斑均匀性不够好的问题,设计了一种自由曲面面型的透镜阵列,用之代替传统复眼透镜阵列。通过自由曲面来控制复眼出射光的能量分布,进而改善照明面光斑均匀性。结果表明,采用此方法,曝光机照明面上的光斑均匀度达到了0.91以上,同时能量利用率达到76%(相对于复眼系统来说基本不变),以上参数可以满足PCB等加工精度的要求。所设计透镜阵列面型连续,可以通过金刚石车削进行精密加工,有望在大面积平行光曝光机照明系统中得到广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Zhao X C, Wu Y F, Xie Y, *et al.* Uniformity simulation and research based on PCB exposure machine illuminating system [J]. *Optical Instruments*, 2010, 32(4): 52-57.
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): 52-57.
- [2] Zhao X C, Liu N W, Wang W, *et al.* Research and design on PCB exposure machine illuminating system based on light tools [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2014, 12(1): 41-44.
赵新才, 刘宁文, 汪伟, 等. 基于Light Tools的PCB曝光机照明系统设计与研究[J]. *光学与光电技术*, 2014, 12(1): 41-44.
- [3] Zhang X C. Research on key technologies of automatic alignment parallel optical exposure machine based on machine vision[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
张学成. 基于机器视觉自动对位平行光曝光机关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [4] Yin G Y, You L B, Wang Q S, *et al.* Line beam

shaping system for preparation of low temperature polysilicon[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0906002.

尹广玥, 游利兵, 王庆胜, 等. 用于低温多晶硅制备的线光束整形系统[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0906002.

- [5] Jain K, Zemel M, Klosner M. Large-area high-resolution lithography and photoablation systems for microelectronics and optoelectronics fabrication [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(10): 1681-1688.
- [6] Baxter G R, Tesone J, Rivard G. Double-sided circuit board exposure machine and method with optical registration and material variation compensation: US5337151[P]. 1994-08-09.
- [7] Antoni M, Singer W, Schultz J, *et al.* Illumination optics design for EUV lithography[C]. *SPIE*, 2000, 4146: 25-34.
- [8] Zhou C, Li X F. Projective stepper for 200 mm×200 mm OLED process [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2012, 41(3): 12-16.
周畅, 李喜峰. 200 mm×200 mm OLED步进投影曝光机[J]. *电子工业专用设备*, 2012, 41(3): 12-16.
- [9] Dong H, Zhang Y F, Li H, *et al.* Light pipe illumination system design for new laser projection display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 012202.
董辉, 张运方, 李慧, 等. 新型激光投影显示方棒照明系统的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 012202.
- [10] Liu P F, Yang B, Lu K. 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.
- [11] Lei C Q, Wang Y F, Yin Z Y, *et al.* Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0502009.
雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 基于微透镜阵列的半导体激光器堆栈匀化系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0502009.
- [12] Shuai C F, Yin S Y, Liu X M, *et al.* Homogenized white light beam generated by red, green and blue lasers based on double fly-eye lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0314002.
帅词凤, 尹韶云, 刘显明, 等. 基于双复眼透镜的三基色激光合成均匀白光束[J]. *光学学报*, 2016, 36(3):

- 0314002.
- [13] Min X H. Exposure machine fly eye type UV-LED surface light source of collimated light system [J]. Printed Circuit Information, 2014(4): 33-37.
闵秀红. 复眼式 UV-LED 面光源的曝光机平行光系统[J]. 印制电路信息, 2014(4): 33-37.
- [14] Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, *et al.* Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. Applied Optics, 1986, 25(3): 377-381.
- [15] Zhou P, Lu W, Lin Y X, *et al.* Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(5): 587-591.
周平, 陆巍, 林宇翔, 等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 587-591.
- [16] Vanderwerf D F. Polarized illumination system for LCD projector: US5995284[P]. 1999-11-30.
- [17] Luo Y, Feng Z X, Han Y J, *et al.* Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source [J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9055-9063.
- [18] Wan Y J, Liu J, Lin H B, *et al.* Fresnel lens of freeform surface for realizing uniform light distribution on general LED light sources [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 062201.
万运佳, 刘杰, 林浩博, 等. 一般 LED 光源均匀配光的自由曲面菲涅耳透镜[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 062201.
- [19] Wu R M. Research on the design method of freeform illumination [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
吴仍茂. 自由曲面照明设计方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [20] Fruendt J, Jarczyński M, Mitra T. Simultaneous multiple uniform spot generation with micro optics [C]. SPIE, 2008, 7062: 70620S.
- [21] Li C, Li N. A LED lens design method for uniform illumination [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2010, 21(3): 46-49.
李澄, 李农. 一种用于均匀照明的 LED 透镜设计方法[J]. 照明工程学报, 2010, 21(3): 46-49.
- [22] Yan X T, Yang J F, Zhang G Q, *et al.* Freeform LED lens design based on longitude-latitude division and tangent-plane iteration [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(2): 022201.
闫兴涛, 杨建峰, 张国琦, 等. 基于经纬划分和切面迭代的自由曲面 LED 透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(2): 022201.