

# 应用于投影光刻离轴照明的自由曲面设计

邢莎莎 吴仍茂 李海峰 郑臻荣\* 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 离轴照明是现代投影光刻中的一种重要的分辨率增强技术。针对不同的照明模式要求,提出了一种利用自由曲面来实现离轴照明的方法。根据入射面和目标面之间的坐标拓扑和能量守恒关系,利用数值求解法得出自相应的折射式自由曲面并对结果进行模拟,分别设计了环形、二极和四极照明,照明效率均达到90%以上,照明均匀性均优于93%。结果表明,可以满足193 nm投影光刻照明系统的设计要求。

**关键词** 光学设计;自由曲面;投影光刻;分辨率增强;照明;光束整形

**中图分类号** TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0322002

## Freeform-Surface Design of Off-Axis Illumination in Projection Lithography

Xing Shasha Wu Rengmao Li Haifeng Zheng Zhenrong Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Off-axis illumination is an important application of resolution enhancement technology in projection lithography. An approach of designing freeform lens for off-axis illumination (OAI) in optical lithography is propose. Based on the mapping between the source and the target and conservation law of energy, a set of partial differential equations are obtained and numerically solved, and then optical performances of the freeform lenses are simulated. With the method, free form surfaces are designed to achieve an annular, dipole, quadrupole lighting. The shape and intensity of illumination distribution on the target surface can be controlled precisely. Also, the illumination efficiency is over 90% and good uniformity can be achieved.

**Key words** optical design; freeform surface; projection lithography; resolution enhancement; illumination; beam shaping

**OCIS codes** 220.3740; 220.2945; 220.3620

## 1 引言

随着半导体技术的发展和芯片集成度的提高,光刻工艺不断向前发展并一再突破其分辨率极限,如何进一步提高投影光刻系统的分辨率和焦深,提高光刻机的性能成了人们关注的热点<sup>[1]</sup>。缩短曝光波长,增大投影物镜的数值孔径,减小工艺因子都可达到提高分辨率的目的,但同时又限制了焦深的增大。目前一般采用分辨率增强技术来解决上述矛盾,常用的分辨率增强技术包括:相移掩膜、离轴照明、光学临近效应校正和偏振光照明等<sup>[1~3]</sup>。

离轴照明是近年来投影光刻系统中常采用的一种分辨率增强技术。常见的照明方式有环形、二极和四极照明,照明方式必须根据掩膜图形进行相应的设置。在采用离轴照明的系统中,掩膜面的照明光线与投影物镜的主光轴有一定的夹角,入射光经掩膜发生衍射,0级与±1级衍射光参与成像<sup>[3,4]</sup>。近年来,为了满足不断缩小的光刻图形线宽的要求,在原有离轴照明方式的基础上提出了多环和多极照明,可有效地减小光学临近效应,进一步提高分辨率和焦深<sup>[5]</sup>。

**收稿日期**: 2010-08-11; **收到修改稿日期**: 2010-09-20

**基金项目**: 国家科技重大专项(2009ZX02202-002)资助课题。

**作者简介**: 邢莎莎(1987—),女,硕士研究生,主要从事光刻照明方面的研究。E-mail: xss222@163.com

**导师简介**: 李海峰(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光学及光电显示等方面研究。E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: zxr@zju.edu.cn

离轴照明可有多种实现方式。早期的 Nikon 和 Cannon 在关于光刻照明系统的专利中,引入不同形状孔径光阑来实现离轴照明<sup>[6]</sup>,比传统方法大大提高了光刻性能,但由于光阑的使用,带来了一部分能量的损失,这对实现高效、均匀的照明是非常不利的。随着照明系统结构的不断改进,用衍射光学元件(DOE)来实现离轴照明逐渐成为主流趋势,DOE 能在保持较高照明效率的同时对光强分布进行精确控制,但一般用于光刻照明的 DOE 设计数据量大,单元尺寸达到微米甚至亚微米量级,这对加工工艺提出了较高要求<sup>[7]</sup>;近年来,德国的 LIMO 公司将不对称的非球面微镜阵列(ROE)应用于离轴照明之中来实现各种光斑形状,效率可接近 100%,但由于加工技术只是 LIMO 公司所独有的,价格昂贵,使得这项技术不能得到广泛应用<sup>[8]</sup>。

自由曲面最早应用于非成像光学中,其基本思想是根据目标照明面的预定照明和光源的发光特性来决定自由曲面的面型。自由曲面不仅可有效控制出射光束的能量分布,在目标面上实现预定的照明模式以满足照明要求,同时又能极大地提高照明系统的能量利用率<sup>[9~12]</sup>。自由曲面同样可以用于光刻离轴照明,形成能量分布均匀的特殊光斑形状,但目前相关研究工作报道较少。

本文在分析光刻离轴照明要求的基础上,提出了利用自由曲面实现离轴照明的方法,给出了对应不同光瞳形状时的设计结果,用照明分析软件对设计结果进行了仿真,并对仿真结果进行了分析。结果表明利用自由曲面实现离轴照明,可以对目标面上任意的光强分布进行精确控制,照明效率高,均匀性好。

## 2 设计原理及过程

光刻投影中的照明系统,除要求均匀照明掩膜面外,还要实现传统照明、环形照明、二极照明和四极照明,并且各种照明方式的相干因子可以连续调节。因此,光刻照明系统一般包括:1)光束整形系统;2)光束变换系统;3)匀束系统;4)光束耦合系统。其中自由曲面属于光束变换系统,将整形后的激光光束形成离轴照明的光束形状。

采用折射式自由曲面来实现离轴照明,自由曲面常用的设计方法主要有两种:数值优化法<sup>[13]</sup>和解偏微分方程法<sup>[12~14]</sup>。本文采用解偏微分方程来求解自由曲面,其设计原理及过程是:根据已知光源发光分布和目标面上照明要求,基于斯涅耳(Snell)定

律和能量守恒建立偏微分方程组,通过求解偏微分方程的数值解,得到曲面上各点的坐标值,以此来构建出自由曲面<sup>[14]</sup>。

### 2.1 坐标系的确定

如图 1 所示,从扩展准直系统出射的光束平行入射于自由曲面上,选取参考坐标系为直角坐标系,设扩展光源  $S$  中心位于坐标轴原点,且沿  $z$  轴垂直入射, $F$  点为折射曲面上的入射点,照明目标面为一平面,为了简化计算,用柱面坐标系来建立自由曲面的方程。

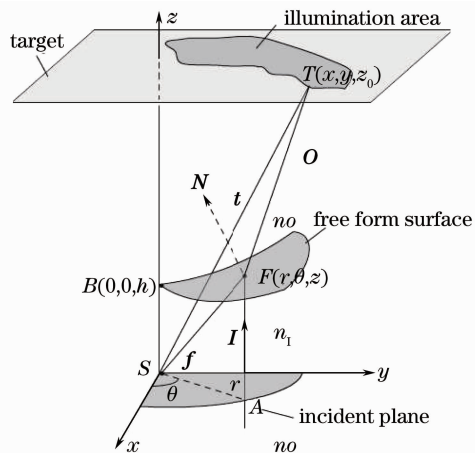


图 1 矢量关系示意图

Fig. 1 Relation between vectors

### 2.2 光线的矢量表达式

在图 1 中, $N$  表示曲面上任意一点的单位法矢; $I$  为入射光的单位法矢; $O$  为经自由曲面折射后出射光的单位法矢。 $A$  为此扩展光源的最大边界点。设  $F$  点的坐标为  $[\theta, r, z(\theta, r)]$ , 将由原点指向点  $F$  的矢量记作  $f$ ,  $\theta$  为  $f$  矢量在  $x$ - $y$  坐标面上的投影与  $x$  轴的夹角,  $r$  为  $f$  矢量在  $x$ - $y$  坐标面上的投影的模,  $z(\theta, r)$  为  $f$  矢量在  $z$  轴方向上投影的长度。

在入射光源为扩展光源的条件下,采用边缘光线法<sup>[15]</sup>建立入射、出射和自由曲面之间的矢量关系方程组。图 1 中入射光单位矢量为

$$I = (0, 0, 1), \quad (1)$$

$f$  矢量在直角坐标系下的表达式为

$$f = (r \cos \theta, r \sin \theta, z), \quad (2)$$

设点  $T$  为目标面上一点,其坐标为  $(x, y, z_0)$ , 将由原点指向点  $T$  的矢量记为  $t$ , 则出射光单位矢量  $O$  为

$$O = \frac{(t - f)}{|t - f|}, \quad (3)$$

式中  $|t - f|$  为曲面上  $F$  点与目标面上  $T$  点之间的

距离。

点  $F$  处的单位法向矢量  $\mathbf{N}$  为  $\mathbf{f}$  在  $\theta$  和  $r$  方向上偏导的叉乘,即

$$\mathbf{N} = \mathbf{f}_\theta \otimes \mathbf{f}_r / |\mathbf{f}_\theta \otimes \mathbf{f}_r|, \quad (4)$$

经过运算化简,最后可得

$$\mathbf{N} = \frac{1}{(\mathbf{z}_r^2 + \mathbf{z}_\theta^2 + r^2)} (\mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y, \mathbf{N}_z), \quad (5)$$

式中  $\mathbf{z}_\theta, \mathbf{z}_r$  为  $\mathbf{z}(\theta, r)$  在  $\theta$  和  $r$  方向上的偏导,  $\mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y, \mathbf{N}_z$  分别为矢量  $\mathbf{N}$  在直角坐标系下  $x, y, z$  方向上的分量:

$$\begin{cases} \mathbf{N}_x = \mathbf{z}_r \cos \theta - \mathbf{z}_\theta \sin \theta \\ \mathbf{N}_y = \mathbf{z}_r \sin \theta + \mathbf{z}_\theta \cos \theta. \\ \mathbf{N}_z = -r \end{cases} \quad (6)$$

### 2.3 位置方程

同时,由矢量形式的 Snell 定律,得出

$$[n_2^2 + n_1^2 - 2 \times n_2 \times n_1 \times (\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \times \mathbf{N} = n_2 \times \mathbf{O} - n_1 \times \mathbf{I}, \quad (7)$$

式中  $n_1$  和  $n_2$  分别为入射和出射介质的折射率;将(5),(3)式代入(7)式中,整理得到关于曲面上的点与目标面上点之间的坐标关系式:

$$x = \frac{N_x [n_2 (z_0 - f_z) - n_1 I_x |t - f|]}{n_2 N_z} + f_x + \frac{n_1}{n_2} I_x |t - f|, \quad (8)$$

$$y = \frac{N_y [n_2 (z_0 - f_z) - n_1 I_x |t - f|]}{n_2 N_z} + f_y + \frac{n_1}{n_2} I_y |t - f|, \quad (9)$$

式中  $I_x, I_y, I_z, f_x, f_y, f_z$  分别为矢量  $\mathbf{I}$  和  $\mathbf{f}$  在直角坐标系下  $x, y, z$  方向上的分量。

### 2.4 能量守恒原理

根据光线的传播遵守能量守恒定律,光源辐射能与目标照明面之间的映射关系如下:

$$\int_0^\theta \int_0^r I(r, \theta) d\theta dr = \int E(t) dS. \quad (10)$$

以目标面上二级照明光斑为例,入射面内半径为  $r$  的入射光束对应于目标面内内径为  $r_{\min}$ ,外径为  $r_1$  的圆环,入射光束截面内角  $\theta$  所在区域对应于目标面照明区域角  $\theta_1$ ,最后可得

$$r_1 = \sqrt{r_{\min}^2 + \frac{[1 - \exp(-\frac{2r^2}{\omega_0^2})](r_{\max}^2 - r_{\min}^2)}{1 - \exp(-\frac{2R_{\max}^2}{\omega_0^2})}}, \quad (11)$$

$$\theta_1 = \frac{\theta(\theta_{\max} - \theta_{\min})}{\pi} + \theta_{\min}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} x = r_1 \cos \theta_1, \\ y = r_1 \sin \theta_1, \end{cases} \quad (13)$$

式中  $\omega_0$  为入射激光光束的束腰半径,  $r_{\max}$  和  $r_{\min}$  分别为光斑的内径和外径,  $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$  分别为光斑极角的最大最小值,  $R_{\max}$  为光束截面最大半径,  $E(T)$  为点  $T$  处的照度分布,  $S$  为目标面照明面积,  $I(r, \theta)$  为入射面上的照明光强。由上式可得到目标面上点的坐标  $x$  和  $y$  与曲面上点的坐标  $r$  和  $\theta$  的又一对关系表达式,将其代入(8),(9)式中,可得  $z$  在  $r$  和  $\theta$  方向上方向上的偏微分方程组,用经典的 Runge-Kutta 方法求解上述方程,将解得的曲面离散点的数据在 3D 建模软件中可建立三维曲面。

## 3 离轴照明所用自由曲面设计及结果

以形成  $y$  方向上的二级照明光斑为例:要在目标面上形成分布均匀的照明光斑,光斑的内径和外径分别为  $r_1 = 30 \text{ mm}$  和  $r_2 = 50 \text{ mm}$ ,极张角  $\phi = 35^\circ$ ,设入射光束为激光光束,并准直为  $R_{\max} = 7 \text{ mm}$  的平面波,自由曲面透镜最大孔径为  $D = 28 \text{ mm}$ ,目标平面与自由曲面的距离为  $L = 500 \text{ mm}$ 。图 2(a) 为 3D 建模软件中生成的自由曲面透镜实体图,图 2(b) 为过自由曲面顶点且在坐标平面  $yo_z$  内的剖面图,图 2(c) 为 Matlab 中生成的自由曲面面型图,自由曲面由曲面  $S_1$  和曲面  $S_2$  构成,曲面  $S_1$  和曲面  $S_2$  关于坐标平面  $xoz$  对称。

将设计得到的结果导入照明分析软件中进行模拟,追迹 1000 万条光线后,得到目标面上的二级照明光强分布,采用同样的设计方法和入射条件,分别设计了用于实现环形、 $x$  方向上的二级和四极照明的自由曲面,并进行了模拟分析,得到各照明模式下目标面上的强度分布,如图 3 所示。

下面从照明效率和照明均匀性两方面对结果进行分析。照明效率  $I$  定义为  $I$  等于目标面上的照明区域接收的能量除以光源发出的总能量,定义照明均匀性  $P$  为

$$P = \left(1 - \frac{E_{\max} - E_{\text{ave}}}{E_{\text{ave}}}\right) \times 100\%, \quad (14)$$

式中  $E_{\max}$  为目标照明区域中的最大照度,  $E_{\text{ave}}$  为平均照度。

设计参数及各照明模式对应的照明效率和照明均匀性如表 1 所示,在未镀膜的情况下,设计的自由曲面在目标照明区域的能量效率大于 90%。其中  $\phi$  为极张角,  $\psi$  为极方位角。

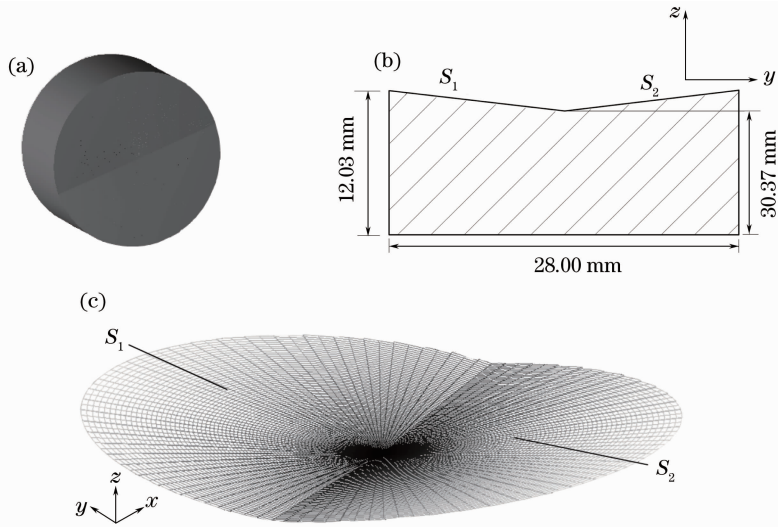


图 2  $y$  方向上二极照明时所得自由曲面面型。(a)自由曲面透镜实体图,(b)自由曲面透镜剖面图,(c)自由曲面面型图  
Fig. 2 Freeform surface shape of diode lighting in  $y$  direction. (a) Real-object map of freeform-surface lens, (b) profile of freeform-surface lens, (c) detail graph of freeform surface

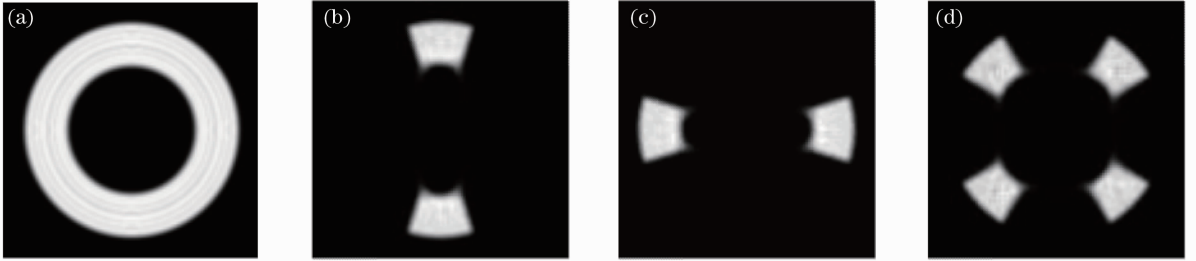


图 3 设计所得目标平面几种离轴照明的光强分布。(a)环形,(b) $y$ 方向上二极,(c) $x$ 方向上二极,(d)四极  
Fig. 3 Design results of intensity distribution on object plane for off-axis illumination. (a) annular, (b)  $y$  direction dipole, (c)  $x$  direction dipole, (d) quadrupole

表 1 设计参数及目标面上的照明分布情况

Table 1 Design parameters and the lighting distribution of target surface

Pupil shape distribution	$\phi / (^\circ)$	$\psi / (^\circ)$	$I / \%$	$P / \%$
Annular	—	—	90.65	93.05
$y$ direction dipole	35	—	90.65	90.09
$x$ direction dipole	35	—	90.64	90.09
Quadrupole	30	45	90.46	85.13

将上述所得到的自由曲面面型应用于光刻照明系统中,如图 4 所示为我们设计的投影光刻照明系

统结构,其中各部分的名称和功能分别如下:1 为扩束准直系统,2 为自由曲面光束变换组件,3 为变焦系统,4 为旋转三棱镜系统,5 为双排复眼阵列,6 为聚光镜组,7 为可变光阑(中间像面),8 为中继耦合远心透镜组,9 为掩膜面。其中自由曲面透镜 2 用来形成离轴照明的各种光瞳形状,复眼阵列 5 用来均匀光束。照明系统中部分元件的参数如表 2 所示。

其中根据设计指标要求,目标照明区域略小于掩膜面的最大尺寸,约为  $103.8 \text{ mm} \times 41.8 \text{ mm}$ 。

将第 3 节所得到的自由曲面透镜应用于以上光

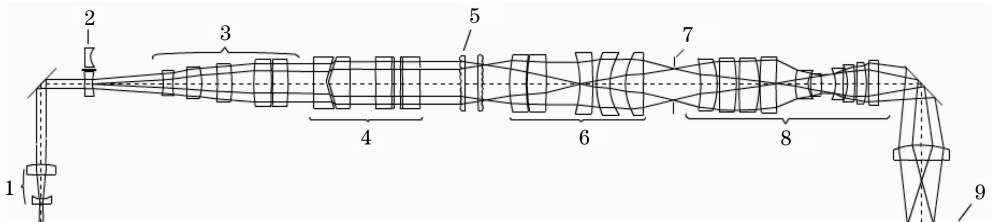


图 4 投影光刻照明系统结构简图

Fig. 4 Schematic of illumination system in projection lithography

刻照明系统中,在照明分析软件中追迹 1000 万条光线以后,可得过掩膜面中心的  $x$  及  $y$  方向横截面上

的光能分布分别如图 5 所示。  
掩膜面上的照明均匀性如表 3 所示。

表 2 投影光刻照明系统中部分元件参数

Table 2 Part of the component parameters of projection lithography illumination system

Component name	Parameters	Value
Collimating and beam expanding system	Magnification	6.5
Zoom-ens system	Zoom ratio	3.2
Fly-eye lens	Lens-element number of $x$ direction	29
	Lens-element number of $y$ direction	61
Relay-lens system	Magnification	0.965
Mask	$x$ direction size /mm	104
	$y$ direction size /mm	42

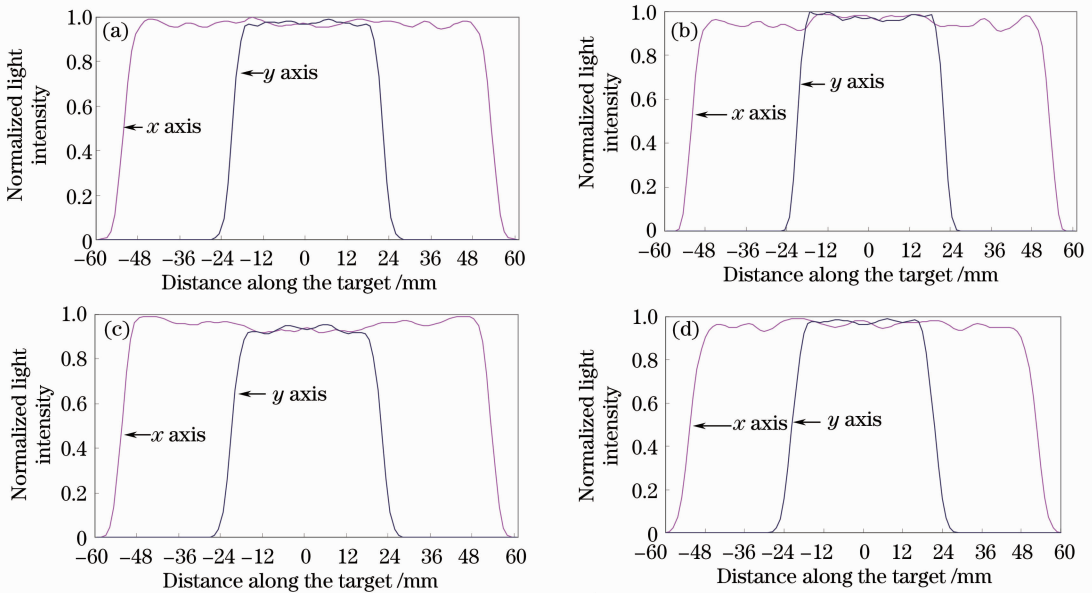


图 5 软件模拟掩膜面上的光强分布图。(a) 环形照明, (b)  $y$  方向上二极照明, (c)  $x$  方向上二极照明, (d) 四极照明  
Fig. 5 Simulated light-intensity distribution on the mask. (a) annular illumination, (b)  $y$  direction dipole illumination, (c)  $x$  direction dipole illumination, (d) quadrupole illumination

表 3 不同光瞳形状分布时掩膜面上的光照均匀性  
Table 3 Distribution of light uniformity with different pupil shapes on the mask

Pupil shape distribution	Light uniformity on the mask
Annular / %	96.04
$y$ direction dipole / %	93.66
$x$ direction dipole / %	93.27
Quadrupole / %	94.38

可见用自由曲面设计取代传统的衍射元件可以在满足照明均匀性的基础上提高光能利用率,是一种可行的离轴照明方法。在效率方面,采用折射式自由曲面透镜,可避免采用一般衍射光学器件在设计过程中带来的能量损失,一般可将效率提高到 90% 以上;同时由于该自由曲面的数值求解原理,在保证求解精度的前提下,自由曲面可有效控制光束的分布,可保证目标面上的照明均匀性大于 93%。

## 4 结 论

本文针对光刻中分辨率增强的离轴照明技术,提出了采用自由曲面设计的思想,论述了基于边缘光线原理,利用坐标拓扑和能量守恒的关系求得自由曲面的设计方法,并给出了采用折射式自由曲面实现离轴照明的设计实例,设计所得的自由曲面分别实现了环形、二极和四极的照明方式;在光源为激光光束的条件下,给出了相应光刻照明系统的设计结果,并从照明效率和均匀性方面对系统进行了分析。

在设计过程中也发现采用自由曲面透镜作为整形和匀光器件也存在着许多影响均匀性和整形效率的因素,如在设计过程中采用了多个子面拼接<sup>[9~11]</sup>的方法来减小畸变,但是由于拼接过程中子面之间的缝隙存在,使得照明区域内某些方向上的照度值

较低,这可以从改变坐标之间的映射关系,构建整体连续、光滑的自由曲面来克服这一影响<sup>[16]</sup>。同时,在设计自由曲面的过程中,由于数值求解的精度和3D软件中NURBS曲线<sup>[17]</sup>建模精度的影响,可能会使计算结果和预期结果有一定的偏差。此外设计的投影光刻照明系统存在一定像差,追迹的光线条数偏少等原因都会对均匀性的模拟结果带来一定影响,如何在原有的基础上提高设计精度将是研究工作下一步改进的目标。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yangyuan, Kang Jinfeng. Development and challenges of lithography for ULSI [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2002, **23**(3): 225~228  
王阳元, 康晋峰. 硅集成电路光刻技术的发展与挑战[J]. 半导体学报, 2002, **23**(3): 225~228
- 2 Paul Luehrmann, Peter van Ooschot, Hans Jasper *et al.*. 0.35  $\mu\text{m}$  lithography using off-axis illumination [C]. *SPIE*, 1993, **1927**: 103~124
- 3 Sun Zhiyuan, Li Yanqiu. Spatial frequency analysis of resolution enhancement technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1758~1760  
孙知渊, 李艳秋. 分辨率增强技术的频谱分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1758~1760
- 4 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangchao. Off-axis illumination for optical lithography [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1): 23~24  
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. 激光杂志, 2005, **26**(1): 23~24
- 5 Moh Lung Ling, Gek Soon Chua, Qunying Lin *et al.*. Customized illumination shapes for 193 nm immersion lithography [C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 35-1~35-11
- 6 Nishinaga. . Exposure apparatus and exposure method capable of controlling illumination distribution [P]. US, 20040239904,

2004

- 7 Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2082~2085  
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射元件设计[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(11): 2082~2085
- 8 H. Ganser, M. Darscht, Yuri V. Miklyaev *et al.*. High-throughput homogenizers for hyper-NA illumination systems [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 2N-1~10
- 9 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
- 10 Cheng Haobo, Feng Yunpeng, Wang Yongtian. Research on free-form optics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(12): 17~22  
程灏波, 冯云鹏, 王涌天. 自由曲面光学研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(12): 17~22
- 11 Yang Bo, Wang Yongtian. Computer aided design of free form reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 721~724  
杨波, 王涌天. 自由曲面反射器的计算机辅助设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(6): 721~724
- 12 Harald Ries, Julius Muschaweck. Tailored freeform optical surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(3): 590~595
- 13 B. A. Jacobson, R. D. Gengelbach. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using monte carlo ray-tracing of an LED source [C]. *SPIE*, 2001, **4446**: 121~128
- 14 Andreas Timinger, Julius Muschaweck, Harald Ries. Designing tailored freeform surfaces for general illumination [C]. *SPIE*, 2003, **5186**: 128~132
- 15 Harald Ries, Ari Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2627~2632
- 16 Florian R. Fournier, William J. Cassarly, Jannick P. Rolland. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5295~5304
- 17 David F. Rogers. An introduction to NURBS: with Historical Perspective [M]. USA: Morgan Kaufmann Publishers, 2001, **10**: 129~135