

文章编号 1004-924X(2008)11-2081-06

# 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计

张巍, 巩岩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 离轴照明作为一种重要的分辨率增强技术被广泛地应用于投影光刻系统。使用衍射光学元件(DOE)作为光刻照明系统的光束整形器件,能够在保持较高照明效率的基础上精确控制离轴照明光束的形状及光强分布。本文利用基于傅里叶变换的分步迭代方法,优化设计了该类衍射光学元件(DOE)。DOE采用了多台阶位相结构,设计所得8台阶DOE设计结果分别实现了偶极、四极、环形及 Bulls-Eye等照明方式,其照明效率都达到了80%以上,与目标光强分布的均方根偏差均 $<7\%$ 。

**关键词:** 衍射光学元件;投影光刻;分辨率增强;照明;光束整形

**中图分类号:** O436.1; TN305.7 **文献标识码:** A

## Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography

ZHANG Wei, GONG Yan

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** As a very important Resolution Enhancement Technology (RETs), Off-axis Illumination (OAI) is widely applied to optical projection lithography system. Application of Diffractive Optical Element(DOE) to OAI not only can control precisely the flexible illumination shape and the intensity profile but also can retain a higher efficiency of light source. In this paper, the four kinds of DOEs with 8 phase levels were designed by using the step-iterative algorithm based Fourier transfer, and the four elements could realize dipole, quadrupole, annular and Bulls-Eye illuminations respectively. The simulation results show that the efficiencies of the light sources are all better than 80% and the Root-Mean-Squares(RMSs) of intensity profiles are all smaller than 7% as compared with that of the ideal one.

**Key words:** Diffractive Optical Element(DOE); projection lithography; resolution enhancement; illumination; beam shaping

收稿日期:2008-02-26;修订日期:2008-04-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40674098)

## 1 引言

为了满足超大规模集成电路特征尺寸不断缩小的需求,投影光刻技术得到了迅速发展。如何提高投影光刻系统分辨率和成像质量成为该领域的研究热点。由瑞利判据可知,系统分辨率  $R = k_1 \lambda / \text{NA}^{[1]}$ , 其中,  $k_1$  为工艺因子,  $\lambda$  为曝光波长, NA 为数值孔径。提高投影光刻系统分辨率的方法主要是降低  $k_1$  和  $\lambda$ , 增大 NA。但  $\lambda$  和 NA 的改变存在诸多的限制, 因此在其一定的情况下必须通过采用降低  $k_1$  因子的分辨率增强技术<sup>[2]</sup> (Resolution Enhancement Technology, RET) 才能进一步延展系统的分辨率极限。目前分辨率增强技术主要有离轴照明、像移掩模、光学邻近效应校正等技术。

离轴照明技术最早由日本学者于 1991 年提出<sup>[3-4]</sup>, 其不仅能提高系统分辨率而且能够明显改善系统焦深, 因此在投影光刻系统中得到了广泛的应用。常用的离轴照明方式有环形、偶极、四极照明等。近年来, 为满足光刻图形线宽的不断缩小和实现特殊图形曝光的要求, 需要采用一些特殊的离轴照明方式, 如 ASML 提出的 Bulls-Eye 照明方式, 其对于特定的光刻图形能够改善曝光的工艺窗口, 有效地提高投影曝光的成像质量<sup>[5]</sup>。

离轴照明可通过在光刻机照明系统中加入光束整形元件来实现。用于投影光刻系统的光束整形元件主要有折射型光学元件和衍射光学元件 (Diffractive Optical Element, DOE) 两类。折射型元件, 如轴锥镜, 具有衍射效率高、制作简单的优点, 但对光强分布的控制能力较弱, 对于偶极、四极和 Bulls-Eye 照明方式, 采用折射型元件是难以实现的。而 DOE 的特点则是能够在保持较高衍射效率的同时对光强分布进行精确控制, 因此 DOE 成为实现离轴照明的理想元件。一般用于光刻系统离轴照明的 DOE, 其子单元个数需  $< 10^6$ , 设计数据量较大, 单元尺寸达到微米甚至是亚微米量级。如何在现有工艺基础上进行该类元件的设计, 提高设计效率和指标是影响 DOE 应用的关键。本文系统介绍了采用分步迭代方法进行该类元件设计的过程, 并给出了设计结果, 迭代 100 次后所得 8 台阶元件分别实现了偶极、四极、环形和 Bulls-Eye 照明方式。

## 2 衍射光学元件设计原理及分步迭代方法

利用 DOE 实现离轴照明的原理如图 1 所示, DOE 被简化为仅对入射波相位进行调制且没有厚度的纯相位元件, 其相位分布为  $\phi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)$ 。入射光束经 DOE 的相位调制后在目标平面上得到所需的光强分布。采用 DOE 实现离轴照明所能得到的最大衍射角度  $\theta$  与 DOE 的单元线宽  $d$  有关, 可由  $d \cdot \sin \theta = \lambda$  来近似计算, 其中  $\lambda$  为入射光束的波长。

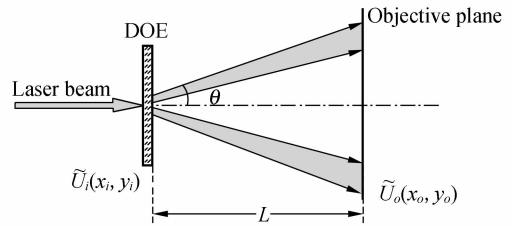


图 1 DOE 实现立轴照明示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DOE optical setup for off-axis illumination

对于图 1 的离轴照明模型, 设沿 Z 方向的入射光束在 DOE 所在平面具有已知的相位分布  $\phi_{\text{laser}}(x_i, y_i)$  和光强分布  $I_i(x_i, y_i)$ 。在满足标量衍射理论的情况下, 由菲涅尔近似可得, 目标平面上光束的复振幅满足

$$\begin{aligned} \tilde{U}_o(x_o, y_o) = & \frac{1}{\lambda L} \iint \{ \sqrt{I_i(x_i, y_i)} \cdot \exp[i\phi_{\text{laser}}(x_i, y_i)] \} \cdot \exp[i\phi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)] \cdot \exp[i\frac{\pi}{\lambda L}(x_i^2 + y_i^2)] \cdot \\ & \exp[-i\frac{2\pi}{\lambda L}(x_i x_o + y_i y_o)] dx_i dy_i, \end{aligned} \quad (1)$$

由于设计主要关心目标平面的光强分布, 因此式 (1) 中忽略了部分常相位因子。令:

$$\tilde{U}_i(x_i, y_i) = \sqrt{I_i(x_i, y_i)} \cdot \exp[i\phi_i(x_i, y_i)], \quad (2)$$

$$\phi_i(x_i, y_i) = \phi_{\text{laser}}(x_i, y_i) + \phi_{\text{DOE}}(x_i, y_i) + \frac{\pi}{\lambda L}(x_i^2 + y_i^2), \quad (3)$$

由式 (1) 可见,  $\tilde{U}_o(x_o, y_o)$  可通过  $\tilde{U}_i(x_i, y_i)$  的傅里叶变换求得。若目标平面上所需的理想光强分布为  $I_o(x_o, y_o)$  已给定, 则 DOE 元件的设计过程就是通过相位恢复的方法得到  $\phi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)$ , 使

$I_i(x_i, y_i)$ 和  $I_o(x_o, y_o)$ 满足:

$$I_o(x_o, y_o) = A |F\{\sqrt{I_i(x_i, y_i)} \cdot \exp[i\phi_i(x_i, y_i)]\}|^2, \tag{4}$$

其中,  $F\{*\}$ 代表傅里叶变换,  $A$ 为常数,可通过 Parseval 定理求出。

基于傅里叶变换的迭代算法是用于解决 DOE 位相恢复问题的一类常用方法,其特点是算法简单、收敛速度快。对于迭代过程中不同的反馈方式,可以得到一些具体的算法,如 G-S 算

$$\begin{cases} U_o^{(k)} = (\sqrt{I_o} + \alpha_k \cdot |\sqrt{I_o} - |U_o^{(k)}||) \exp[i\arg(U_o^{(k)})] \\ U_i'^{(k+1)} = F^{-1}\{U_o^{(k)}\} \\ U_i^{(k+1)} = |\sqrt{I_i}| \exp\{i[\beta_k \cdot \arg(U_i'^{(k+1)}) + (1-\beta_k)\arg(U_i^{(k)})]\} \\ U_o'^{(k+1)} = F\{U_i^{(k+1)}\} \end{cases}, \tag{5}$$

其中,  $\arg(*)$ 代表取复振幅的位相。 $\alpha_k$ 是输出振幅反馈因子,  $\beta_k$ 是输入位相反馈因子,  $k$ 是迭代次数的标号,两者分别由某个随机分布给出,即在每一步循环时分别取一定范围内的不同随机值。在每一步迭代中对  $\alpha$ 和  $\beta$ 的任一随机值计算得出的  $U_o^{(k+1)}$ 如果比  $U_o^{(k)}$ 更接近理想值则进入下一步优化,如果相反则重新选取一组  $\alpha$ 和  $\beta$ 直至费用函数下降。

### 3 离轴照明用 DOE 结构参数及设计结果

几种常用的离轴照明方式如图 2 所示,实际光刻设备选用何种照明方式与所需曝光的图形有关。

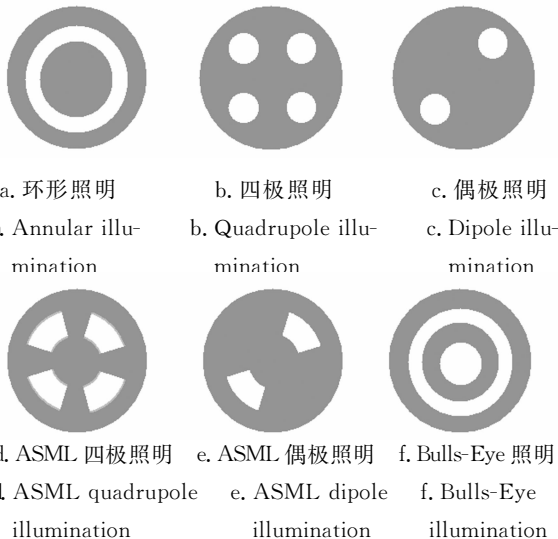
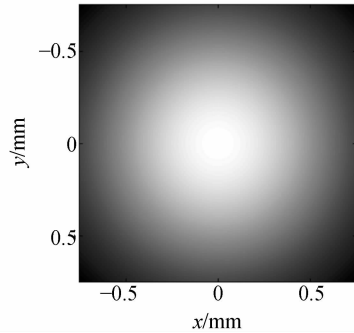


图 2 几种离轴照明方式示意图

Fig. 2 Several modes for off-axis illumination

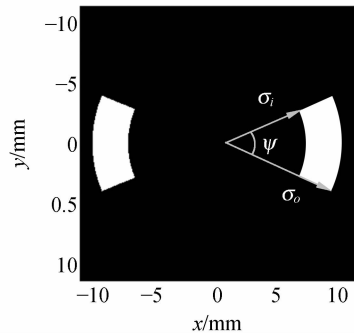
法<sup>[6]</sup>、输入-输出算法<sup>[7]</sup>、位相混合算法<sup>[8]</sup>等。分布迭代算法<sup>[9]</sup>是对位相混合算法的一种改进,此算法通过提高变换系统配置参数的自由度即在输入位相与输出振幅中同时引入反馈,并用一定范围的随机分布代替原来的固定反馈因子,可以有效提高收敛速度,改善结果。参考文献<sup>[9]</sup>对分步迭代算法和其它算法进行了比较,证明了该方法的有效性。分步迭代算法的具体实现是通过以下操作来完成的。

对于离轴照明的参数设定,如最大衍射角、相干因子等,与光刻设备照明系统的总体要求有关,已超出本文所讨论的范围,故不做详细论述。参考已有光刻设备照明系统对光束整形元件的要



(a)DOE 入射光强分布

(a) Intensity distribution of input beam on DOE



(b)目标平面理想输出光强分布

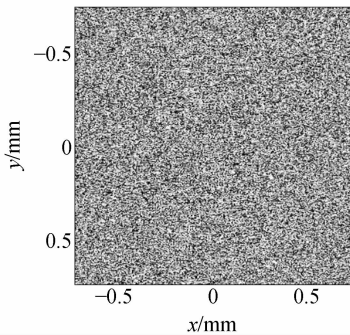
(b) Ideal intensity distribution of output beam on objective plane

图 3 DOE 设计输入与目标输出的光强分布

Fig. 3 Intensity distributions of input beam and ideal output beam on designed DOE

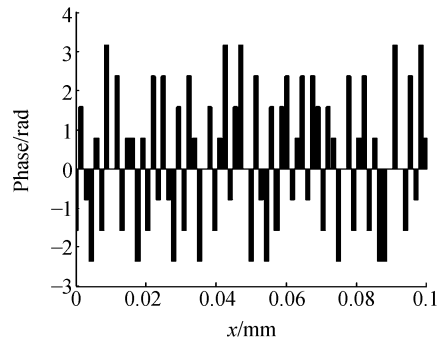
求,考虑到元件的可加工性,采用如下参数进行 DOE 的设计。设入射光束为直径 1.5 mm 平面波,光强为高斯分布,如图 3(a)所示,波长 193 nm。DOE 通光口径为 1.5 mm,单元数为  $N=1\ 024\times 1\ 024$ ,单元尺寸为  $1.5\ \mu\text{m}$ ; DOE 采用 8 台阶位相结构。以偶极照明设计为例,目标平面与 DOE 所在平面的距离  $L=175\ \text{mm}$ ,目标光场分布如图 3(b)所示,外半径  $\sigma_o=10.5\ \text{mm}$ ,内半径  $\sigma_i=7.5\ \text{mm}$ ,极角  $\psi=45^\circ$ ,照明区域内要求光强均匀分布。采用照明效率  $\eta$ (照明区域能量占总能量的比)和所得光强分布与目标光强分布的均方根偏差  $\chi=\sqrt{\sum_N(I_{\text{design}}-I_o)^2/(N-1)}$  来对 DOE 的性能进行评价,其中  $I_{\text{design}}$  为设计所得目标平面上的光强分布。

根据如上参数采用分布迭代方法进行设计,DOE 的初始位相为随机分布,迭代 100 次后,所得结果如图 4 所示。其中图 4(a)为设计所得 DOE 位相,图 4(b)为图 4(a)沿 X 轴方向过中心的一维局部放大图,可明显看到所得 DOE 的 8 台阶位相结构,图 4(c)为设计所得目标平面的光强分布图,通过数值计算,其照明效率  $\eta=81.7\%$ , $\chi=3.5\%$ ,图 4(d)为图 4(c)沿 X 轴方向过中心的一维光强分布图。由图 4 的设计结果可见,所得 DOE 实现了偶极照明的需求,照明形状和图形陡边性都得到了很好的控制。



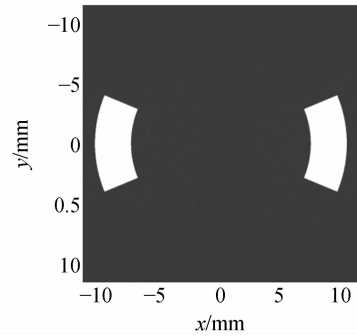
(a) DOE 位相分布

(a) Phase distribution of DOE



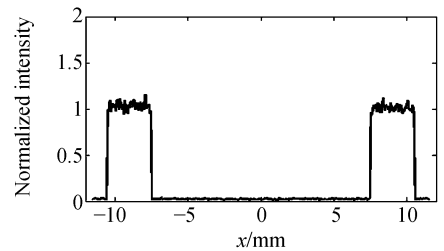
(b) 图(a)一维位相分布局部图

(b) One-dimension local phase frame of (a)



(c) 目标平面光强分布

(c) Distribution of output beam on objective plane



(d) 图(c)过中心水平方向一维光强分布

(d) One-dimension intensity distribution of (c)

图 4 实现偶极照明的 DOE 设计

Fig. 4 Design of DOE for dipole illumination

采用相同的设计方法和入射光束条件,分别设计了用于实现四极、环形和 Bulls-Eye 照明的 DOE,其设计参数及所得指标见表 1,其中  $\sigma_c$  为 Bulls-Eye 照明中心圆形区域半径,设计所得光强分布如图 5 所示。

表 1 设计参数及所得指标

Tab.1 Parameters and indexes in design

	$L$ (mm)	$\sigma_o$ (mm)	$\sigma_i$ (mm)	$\sigma_e$ (mm)	$\Psi(^{\circ})$	$\eta$ (%)	$\chi$ (%)
四极照明				/	45	83.0	4.5
环形照明	175	10.5	8.5	/	/	88.2	5.2
Bulls-Eye 照明				4	/	91.2	6.3

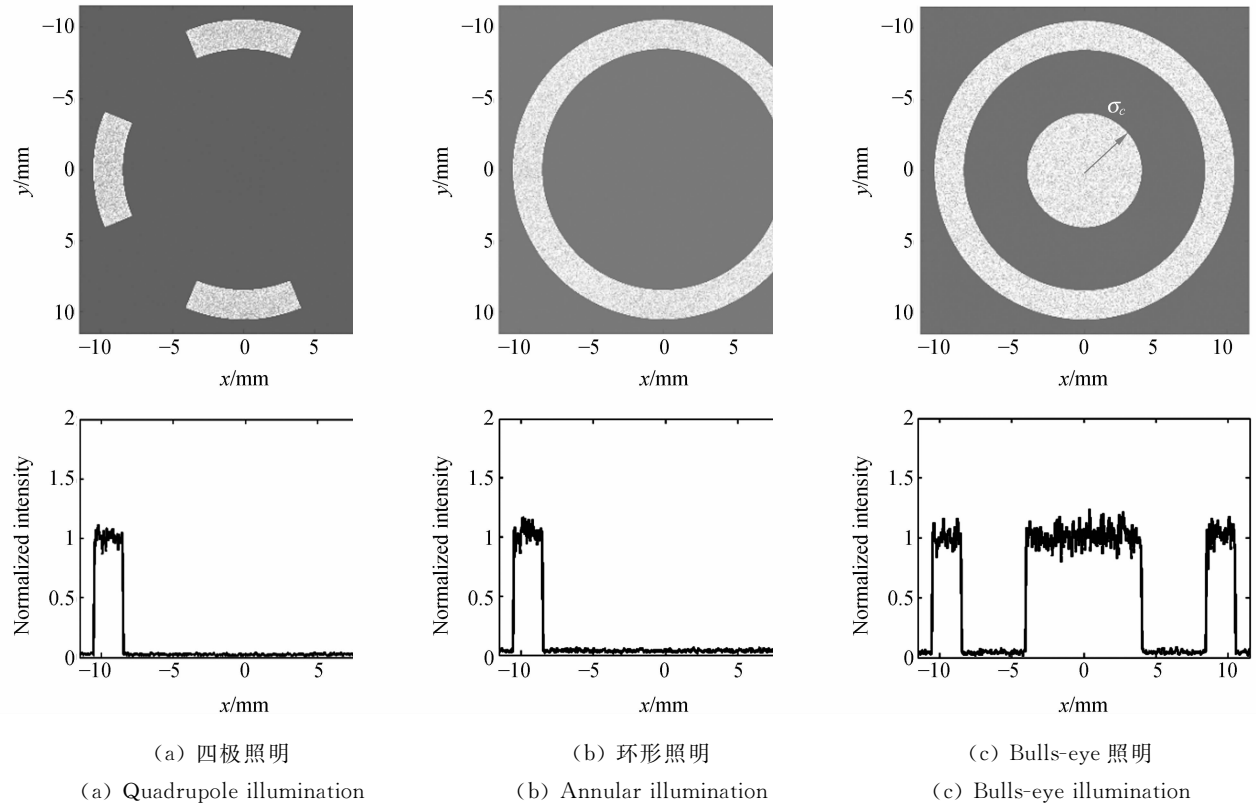


图 5 设计所得目标平面光强分布

Fig. 5 Design results of intensity distributions on objective plane

从图 4、5 能够看到,照明区域中光强存在一定的高频调制,影响了照明的均匀性。通常在光刻设备的照明系统中还会采用专门的匀光装置对照明光束进行匀光,以便有效降低这种高频调制所造成的影响。此外,对于迭代设计结果中部分幅度较大的调制还可通过优化搜索的方法<sup>[10-11]</sup>,在元件的设计过程中予以去除,进一步提高设计指标。

### 4 结 论

本文结合投影光刻照明系统的需求,系统地论述了用于实现离轴照明的衍射光学元件的设计

原理及基于傅里叶变换的分步迭代设计方法,并给出了相关的设计实例。设计所得 8 台阶 DOE 分别实现了偶极、四极、环形和 Bulls-Eye 照明方式,体现了该方法设计的 DOE 对光强分布控制的灵活性。另外,采用分步迭代设计方法设计的 DOE 元件在保证照明效率 > 80% 的基础上,照明光强分布也可获得准确的控制,设计结果显示与目标光强分布的均方根偏差均 < 7%。

本文所设计的 8 台阶 DOE 其子单元尺寸为 1.5 μm,考虑到实际照明系统可能需要更大的衍射角度,则由公式  $d \cdot \sin \theta = \lambda$  可知,元件的单元尺寸还要进一步减小,因此对元件加工的横向分辨率提出了较高的要求。常用的 DOE 加工方法

较多<sup>[12]</sup>,其中电子束曝光具有较高的横向精度,目前其最小曝光线宽可 $< 90$  nm。例如德国 Raith 公司的 RAITH 50 电子束曝光设备,最小曝光线宽可达 40 nm,对准精度为 2 nm,可用于线宽 100 nm 以下图形的投影曝光,因此,采用电子束曝光方法能够满足该类 DOE 加工的需求。经电子束曝光后的 DOE 基片可采用离子束刻蚀<sup>[13]</sup>的方法在其表面刻蚀产生台阶结构,对于 8

台阶相结构,若元件的工作波长为 193 nm,采用融石英作为基片时,最小刻蚀深度约为 50 nm。由于该类元件的直径较小,刻蚀深度较浅,故目前的离子束刻蚀设备,如国产的 LKJ-100 型离子束刻蚀系统,其离子源束流稳定性优于 1%,可以用于该元件的加工。由此可见,采用迭代算法设计所得的 DOE 元件能够通过现有的工艺技术进行加工制作。

## 参考文献:

- [1] LEVINSON H J. *Principles of Lithography* [M]. Bellingham Washington:SPIE Press, 2001.
- [2] HURT R,HOVE L V D. Resolution enhancement techniques in optical lithography [C]. *Semiconductor Fabtech, London, Henley Publishing Trans-world House*, 1999:241-244.
- [3] NOGUCHI M, MURAKI M, IWASAKI Y, *et al.*. Sub-half micron lithography system with phase shifting effect [J]. *SPIE*, 1992, 1674:92-96.
- [4] SHRIRAISHI N, HIRUKAWA S, TAKEUCHI Y, *et al.*. New imaging technique for 64M-DRAM [J]. *SPIE*, 1992, 1674:741-746.
- [5] FINDERS J,ENGELEN A,VADENBERGHE G, *et al.*. Experimental evaluation of Bulls-Eye illumination for assist-free random contact printing at sub-65nm node [J]. *SPIE*, 2006, 6154:1-12.
- [6] GERCHBERG R W,SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures [J]. *Optik*, 1972, 35(2):237-246.
- [7] FIENUP J R. Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms [J]. *Opt. Eng.*, 1980, 19(3):297-305.
- [8] DENG X G, LI Y P, QIU Y, *et al.*. Phase-mixture algorithm applied to design of pure phase elements[J]. *Chinese J Laser*, 1995, B4(5):447-454.
- [9] 张巍, 张晓波, 舒方杰, 等. 采用分步迭代法设计制作衍射光学元件[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17:1665-1668. ZHANG W,ZHANG X B,SHU F J,*et al.*. Design of diffractive optical elements by step iterative algorithm [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17:1665-1668. (in Chinese)
- [10] WANG W,LI T,LI Y P. A hybrid algorithm for the design of DOE in uniform illumination [J]. *Opt. Lett.*, 2000, 181:261-265.
- [11] 张巍, 舒方杰, 张晓波, 等. 均匀照明用衍射光学器件的空间频域优化设计方法[J]. *中国激光*, 2007, 34:1388-1392. ZHANG W,SHU F J,ZHANG X B, *et al.*. Spatial frequency spectrum optimization method for design of diffractive optical elements in uniform illumination [J]. *Chinese J Laser*, 2007, 34:1388-1392. (in Chinese)
- [12] 任延同, 付永启. 衍射光学元件制作技术及未来展望[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(2):7-11. REN Y T,FU Y Q. Fabrication technology & future development for diffractive optical elements [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2):7-11. (in Chinese)
- [13] 任延同. 离子刻蚀技术现状与未来发展[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(2):7-14. REN Y T. Presence and future developing tendency of ion-etching technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(2):7-14. (in Chinese)

**作者简介:**张巍(1978—),男,博士,助理研究员,主要从事衍射光学元件设计和应用等方面的研究。E-mail:wzhangys@sina.com

**通讯作者:**巩岩(1968—),男,博士,研究员,主要研究方向为光学系统总体设计和短波段光学技术。E-mail:gongy@sklao.ac.cn