

用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计

胡中华^{1,2} 杨宝喜^{1,2} 朱菁¹ 肖艳芬¹ 曾爱军^{1,2} 黄惠杰^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 投影光刻机普遍采用衍射光学元件(DOE)来产生各种照明模式。针对投影光刻机中准分子激光器空间相干性差的特点,提出了一种混合分区设计方法,并利用该方法对产生传统照明模式、二极照明模式和四极照明模式的 DOE 进行了具体的设计。仿真分析了采用常规重复分区方法和混合分区方法的两类设计结果,并对它们的远场光强分布进行了详细的比较分析。在相同的局部优化算法条件下,相对于常规重复分区方法的设计结果而言,混合分区方法设计的 DOE 可使传统照明模式的非均匀性从 26.45% 下降到 1.12%,二极照明模式的非均匀性从 19.93% 下降到 5.45%,四极照明模式的非均匀性从 17.73% 下降到 3.54%。混合分区设计方法无需改变局部优化算法,在保持高衍射效率的同时能大幅度提高光瞳均匀性。

关键词 光学设计; 衍射光学元件; 混合分区设计; 迭代傅里叶变换; 光瞳整形; 投影光刻

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0616001

Design of Diffractive Optical Element for Pupil Shaping Optics in Projection Lithography System

Hu Zhonghua^{1,2} Yang Baoxi^{1,2} Zhu Jing¹ Xiao Yanfen¹ Zeng Aijun^{1,2} Huang Huijie^{1,2}

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)
(² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The diffractive optical element (DOE) is widely used to generate various illumination modes for pupil shaping optics in the projection lithography system. A mixed multi-region design method is proposed to calculate the phase of DOE, aiming at the poor spatial coherence of excimer laser. The DOEs generating conventional, dipole and quadrupole illumination modes are designed and analyzed by both the repeated multi-region design and the mixed multi-region design. Compared with the results of the repeated multi-region design method, the non-uniformities of the mixed multi-region design method can decrease from 26.45% to 1.12%, from 19.93% to 5.45% and from 17.73% to 3.54% respectively for the conventional, dipole and quadrupole illumination modes using the same local optimization algorithm. The analysis results indicate that the DOE designed by the mixed multi-region design can improve the uniformity of the far-field intensity distribution greatly while maintaining a high diffractive efficiency without changing the local optimization algorithm.

Key words optical design; diffractive optical element; mixed multi-region design; iterative Fourier transform; pupil shaping; projection lithography

OCIS codes 050.1970; 110.3960; 260.1960

1 引言

投影光刻技术是大规模集成电路的关键制造技术之一。为了满足光刻图形特征尺寸不断缩小和实

现特殊图形曝光的需求,人们发展了多种分辨率增强技术,使光学光刻技术的生命力不断延伸。离轴照明技术是投影光刻机中最为常用且最为有效的一

收稿日期: 2013-01-07; 收到修改稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX02402)和国家国际科技合作项目(2011DFR10010)资助课题。

作者简介: 胡中华(1984—),男,博士研究生,主要从事高数值孔径光学光刻技术方面的研究。

E-mail: huzhonghua@siom.ac.cn

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,研究员,主要从事光散射测量技术、光学生物传感技术、光学检测技术和光学光刻技术等方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn

种分辨力增强技术,随着光学光刻技术的不断发展,离轴照明技术已成为光刻技术中的一个必备技术并不断发展^[1]。在投影光刻过程中,需要针对不同的掩模结构采用不同的照明模式,以增强光刻分辨力,增大焦深,提高成像对比度,从而得到更好的光刻性能^[2]。常用的照明模式有传统照明模式、环形照明模式、二极照明模式和四极照明模式等。在投影光刻机照明系统中,光瞳整形单元和匀光单元是两个核心单元。光瞳整形单元用来实现各种具有较高光瞳均匀性的照明模式,匀光单元进一步提高均匀性以实现均匀照明,由于投影光刻机照明系统照明均匀性极高,因此在光瞳整形时应尽可能地提高光瞳均匀性。在投影光刻机中,普遍采用衍射光学元件(DOE)来实现各种照明模式,主要得益于 DOE 能够在保持较高衍射效率的基础上精确控制照明模式的形状及光强分布^[3]。

投影光刻机中 DOE 的设计是在已知输入与输出的条件下求解相位恢复的过程,通常采用基于标量衍射理论的迭代傅里叶变换算法(IFTA)来计算相位分布^[4]。盖师贝格-撒克斯通(G-S)算法是 1971 年 Gerchberg 和 Saxton 提出的相位迭代算法。G-S 算法在最初几次迭代中,收敛速度较快,但随后收敛速度大大减慢,且均匀性不高。为此,许多学者相继提出了多种改进算法,通过引进一些参数来控制其误差函数并改善收敛速度,同时提高均匀性^[5]。

在实际应用中 DOE 往往需要较大的尺寸,设计时抽样点数很多。由于计算机内存有限,不可能计算出整个区域,因此在设计时需要划分成多个子区域,而且这种多分区设计对入射光束的光强变化和对准误差等因素不敏感。用于投影光刻机光瞳整形的 DOE 设计通常是采用重复分区设计,即先计算出一个子区域的相位,然后将这个相位排成阵列。一个子区域产生的远场光强分布就代表了整个 DOE 产生的远场光强分布。由于子区域在采用 G-S 算法进行设计时往往会产生较大的光强起伏,因此整个 DOE 产生的远场强度波动较大。根据准分子激光器空间相干性差的特点,提出了一种混合分区设计方法,在不改变子区域优化算法的前提下,与重复分区设计相比大大提高了光瞳均匀性。

2 设计原理

DOE 的工作原理如图 1 所示。DOE 放置在傅里叶变换透镜的前焦面上,激光入射到 DOE 表面后在傅里叶变换透镜的后焦面上产生衍射图样,衍

射图样的形状及光强分布取决于 DOE 的相位分布。根据惠更斯-菲涅耳原理,DOE 衍射图样是由 DOE 面上每一点透射波前在远场上的叠加所形成。

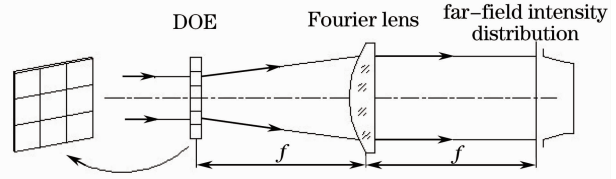


图 1 DOE 工作原理图

Fig. 1 Working principle schematic of DOE

根据惠更斯-菲涅耳原理,远场光强在任一点的复振幅可以表示为^[6]

$$U(x_o, y_o) = \frac{1}{\lambda f} \iint \sqrt{I(x_i, y_i)} \times \exp[j\varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i)] \times \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda f}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda f}(x_i x_o + y_i y_o)\right] dx_i dy_i, \quad (1)$$

式中下标 i 表示输入场相关的量,下标 o 表示输出场相关的量,j 表示虚常数, λ 为入射激光波长, f 是傅里叶变换透镜的焦距, $I(x_i, y_i)$ 表示输入场光强分布, φ_{DOE} 表示 DOE 的相位分布。

在重点考虑远场光强分布的情况下,可以忽略常数相位因子。不妨假设

$$\varphi(x_i, y_i) = \varphi_{\text{DOE}}(x_i, y_i) + \frac{\pi}{\lambda f}(x_i^2 + y_i^2), \quad (2)$$

远场光强分布就能表示为^[6]

$$I(x_o, y_o) = |U(x_o, y_o)|^2 =$$

$$A \left| \mathcal{F}\{\sqrt{I(x_i, y_i)} \cdot \exp[j\varphi(x_i, y_i)]\} \right|^2, \quad (3)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。 A 是一个常量,它由 Parseval 定理决定。(3)式建立了远场光强分布 $I(x_o, y_o)$ 和相位分布 $\varphi(x_i, y_i)$ 之间的关系。

在已知输入场和输出场光强分布的情况下,可以通过傅里叶变换及其逆变换来求解相位分布 $\varphi(x_i, y_i)$,进而得到 DOE 的相位。IFTA 就是在输入场和输出场之间反复进行傅里叶变换及其逆变换实现的。基于这种迭代傅里叶变换的思想,人们研究了许多算法及其改进算法来改善光强均匀性或者提高衍射效率,比如 G-S 算法^[7],输入-输出算法^[8],自适应加法^[9]以及其他改进算法^[10~13]。在此采用 G-S 算法来解决相位恢复问题。G-S 算法的迭代过程如下^[5,7]:

$$\varphi(x_i, y_i) = \arg\{\mathcal{F}^{-1}\{\sqrt{I(x_0, y_0)} \cdot \exp[j\varphi(x_0, y_0)]\}\}, \quad (4)$$

$$U(x_0, y_0) = \mathcal{F}\{\sqrt{I(x_i, y_i)} \cdot \exp[j\varphi(x_i, y_i)]\}, \quad (5)$$

$$\varphi(x_0, y_0) = \arg[U(x_0, y_0)], \quad (6)$$

$$U(x_i, y_i) = \mathcal{F}^{-1}\{\sqrt{I(x_0, y_0)} \cdot \exp[j\varphi(x_0, y_0)]\}. \quad (7)$$

已知输出场光强分布,首先假设输出场的初始相位 $\varphi(x_0, y_0)$ 为随机分布,通过傅里叶逆变换 (\mathcal{F}^{-1}) 得到 $\varphi(x_i, y_i)$; 在输入场引入限制条件,即以已知的入射光场振幅替代前一次傅里叶逆变换得到的振幅,同时保持相位不变 (\arg 表示取相位); 然后作傅里叶变换,得到输出平面光场分布 $U(x_0, y_0)$; 在输出场引入限制条件,即以给定的光场分布取代 $U(x_0, y_0)$ 的振幅,保留相位; 接着再作逆傅里叶变换,如此循环下去,直到得到满意的结果或者达到足够多的循环次数为止。为了实现较高的光强均匀性或者较高衍射效率,评价函数可选取为

$$\Delta_{\text{NU}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N \left(\frac{I_n - I_{\text{mean}}}{I_{\text{mean}}} \right)^2}, \quad (8)$$

$$\eta_{\text{DE}} = \frac{I_{\text{ROI}}}{I_{\text{total}}}, \quad (9)$$

式中 Δ_{NU} 表示光瞳非均匀性, N 为衍射图样感兴趣区域 (ROI) 的抽样点数, I_{mean} 为 ROI 强度的平均值; η_{DE} 表示衍射效率, 是感兴趣区域的总光强 (I_{ROI}) 与远场图样总光强 (I_{total}) 之比。

由于投影光刻用准分子激光器产生的是多横模激光,空间相干性很差,其原因在于模式内部的光相干,而不同模式的光非相干,这也是在众多激光器中只有准分子激光器能用作光刻机光源的原因^[14,15]。因此 DOE 产生的远场光强分布是每一个激光模式产生的光强分布的非相干叠加,即:

$$I = \sum_{k=1}^m I_k, \quad (10)$$

式中 I_k 代表第 k 个激光模式产生的远场光强分布,由 (3) 式计算可得; m 代表激光模式的数量。

本文提出了一种混合分区设计方法:分别计算 DOE 每一个子区域的相位,然后根据 DOE 物理尺寸大小随机排成阵列。由于整个 DOE 产生的远场光强分布是每个子区域产生的远场光强分布的强度叠加,叠加的效果与子区域的位置无关,故子区域无需规则排列,随机排列即可。同时,利用某种迭代算法计算出来的每个子区域产生的强度起伏是随机的,故不可能进行有规律的排列。假设 DOE 被划分成 $p \times q$ 个

子区域,则 DOE 的相位分布 Φ 可表示为

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1q} \\ \vdots & \varphi_{rc} & \vdots \\ \varphi_{p1} & \cdots & \varphi_{pq} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 φ_{rc} ($r=1,2,\dots,p;c=1,2,\dots,q$) 表示第 $(r-1) \times q + c$ 个子区域相位分布,每一个子区域的相位单独计算。如果每一个子区域的相位都是独立计算的,这样就能在一定程度上使得远场强度波动更加平滑。文中提出的分区单独设计,相比传统的分区设计虽然均匀性有所改善,但设计和仿真的计算量会增加。

3 仿真分析

根据 DOE 的工作原理和设计思想,设计了产生传统照明模式和二极照明模式的 DOE,并分析了远场光强分布。考虑到 DOE 的实际加工,相位被量化成 8 台阶。DOE 的物理尺寸是 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, 准分子激光波长为 193 nm 。不妨假设每一个激光模式都是一个单位振幅平面波,则可以认为每一个模式内部的光是相干的,不同模式的光是非相干的。准分子激光可以看成是许多个横向偏移的激光模式的组合,设计中假设每一个模式的大小为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。远场抽样长度 $\Delta x'$ 由下式决定^[12,16]:

$$\Delta x' = \frac{\lambda f}{d}, \quad (12)$$

式中 d 表示单个激光模式大小,傅里叶变换透镜焦距 $f=1000 \text{ mm}$ 。

针对产生传统照明模式、二极照明模式和四极照明模式的 DOE,每一种设计均采用了 2 种方案:重复分区设计和混合分区设计。为了实现较高的光瞳均匀性,设计时选取 (8) 式作为评价函数,迭代次数为 200 次,迭代设计时保留非均匀性 Δ_{NU} 最小时对应的相位,达到迭代次数后停止迭代。下面就 DOE 设计完成之后的远场光强分布进行仿真、分析和比较。

3.1 传统照明

设计产生传统照明模式的光斑半径为 25 mm 。对重复分区设计而言,只需对 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的子区域进行优化设计。对混合分区设计而言,每一个子区域的相位都是独立计算,然后随机排成 25×25 的阵列。设计时选取 DOE 的特征尺寸为 $3.2 \mu\text{m}$ 。DOE 被划分成 25×25 个子区域,激光模式的大小和子区域的尺寸相同。采用两种设计方案设计所得的传统照明

模式远场分布如图 2(a)和(b)所示,图 2(c)和(d)是相应沿 X 轴的一维光强分布。重复分区设计和混合分

区设计的衍射效率分别为 96.92%和96.66%,光瞳非均匀性分别为 26.45%和 1.12%。

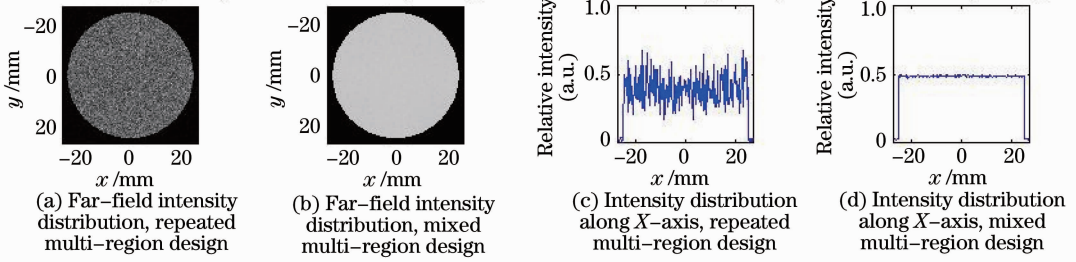


图 2 传统照明模式的光强分布

Fig. 2 Intensity distribution of the conventional illumination mode

3.2 二极照明

图 3 定义了二极照明模式的参数, σ_o 为外半径, σ_i 为内半径, α 为极张角。设计实现二极照明模式参数外半径 $\sigma_o = 25$ mm, 内半径 $\sigma_i = 1$ mm, 极张角 $\alpha = 30^\circ$ 。

设计时选取 DOE 特征尺寸仍为 $3.2 \mu\text{m}$ 。设计所得的二极照明模式远场分布及相应的一维光强分布如图 4 所示。重复分区设计和混合分区设计的衍射效率分别为 91.98%和 91.51%, 光瞳非均匀性分别为 19.93%和 5.45%。

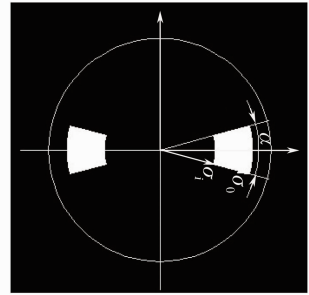


图 3 二极照明模式参数定义

Fig. 3 Definition of the dipole illumination mode

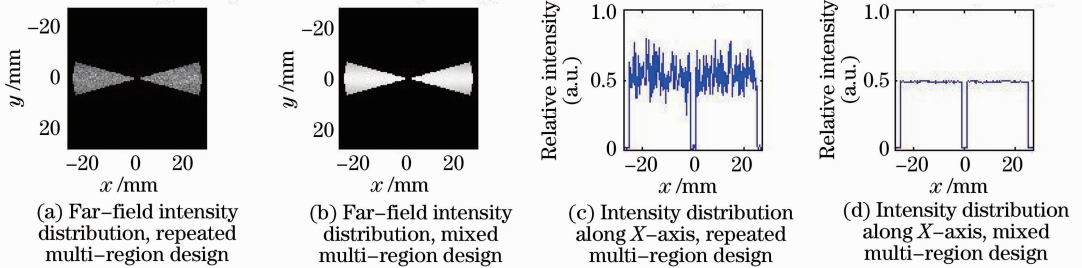


图 4 二极照明模式的光强分布

Fig. 4 Intensity distribution of the dipole illumination mode

3.3 四极照明

图 5 定义了四极照明模式的参数, σ_o 为外半径, σ_i 为内半径, α 为极张角, β 为极方位角。设计实现四极照明模式参数外半径 $\sigma_o = 25$ mm, 内半径 $\sigma_i =$

1 mm, 极张角 $\alpha = 30^\circ$, 极方位角 $\beta = 45^\circ$ 。

设计时选取 DOE 特征尺寸仍为 $3.2 \mu\text{m}$ 。设计所得的四极照明模式远场分布及沿着对角线方向的一维光强分布如图 6 所示。重复分区设计和混合分区设计的衍射效率分别为 90.92%和 90.56%, 光瞳非均匀性分别为 17.73%和 3.54%。

从以上的设计结果来看, 混合分区设计提供了一个更好的设计结果。尽管衍射效率稍微有所下降, 但是非均匀性却大幅下降。传统照明模式的非均匀性从 26.45%下降到 1.12%, 二极照明模式的非均匀性从 19.93%下降到 5.45%, 四极照明模式的非均匀性从 17.73%下降到 3.54%。因此相比常用的重复分区设计, 混合分区设计是一种更有效的设计方法。

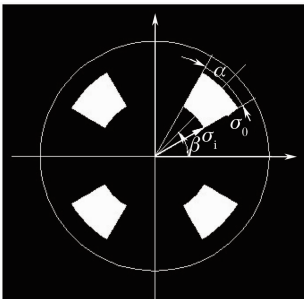


图 5 四极照明模式参数定义

Fig. 5 Definition of the quadrupole illumination mode

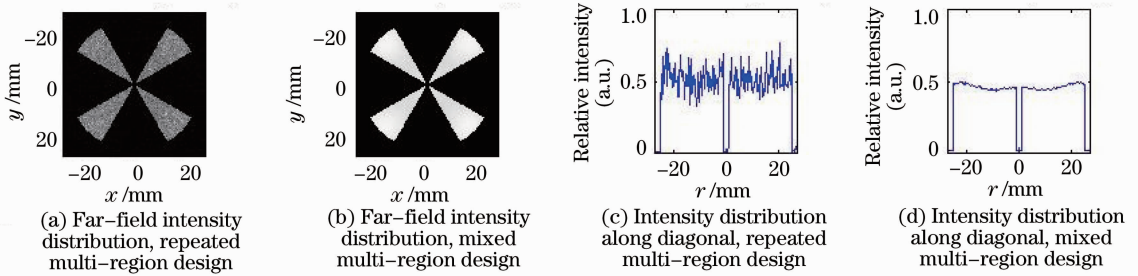


图6 四极照明模式的光强分布

Fig. 6 Intensity distribution of the quadrupole illumination mode

4 结 论

投影光刻用准分子激光器具有较差的空间相干性。基于这种特性提出了一种设计 DOE 的混合分区方法,在不改变局部优化算法如 G-S 算法的基础上,保持了较高的衍射效率,提高了光瞳均匀性。比较和分析了重复分区设计和混合分区设计这两种设计方法的性能,三种照明模式的非均匀性分别从 26.45%、19.93%和 17.73%下降到 1.12%、5.45%和 3.54%。分析结果表明,混合分区设计方法是一种有效的可用于投影光刻机光瞳整形的 DOE 设计方法。

参 考 文 献

- Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing *et al.*. Pupil shaping techniques in high resolution projection exposure tools[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(11): 111101
胡中华, 杨宝喜, 朱菁等. 高分辨率投影光刻机光瞳整形技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(11): 111101
- Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1): 23~25
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): 23~25
- Zhang Wei, Gong Yan. Vector analysis of diffractive optical elements for off-axis illumination of projection lithographic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1005002
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件的矢量分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1005002
- Oliver Ripoll, Ville Kettunen, Hans Peter Herzig. Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(11): 2549~2556
- Yan Shuhua. Design of Diffractive Micro-Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. 66~76
颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 66~76

- Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2081~2086
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2081~2086
- R. W. Gerchberg, W. Q. Saxton. A practical algorithm for determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**(2): 237~246
- J. R. Fineup. Iterative method applied to image reconstruction and to computer generated holograms[J]. *Opt. Engng.*, 1980, **19**: 297~306
- V. A. Soifer, V. V. Kotlyar, L. L. Doskolovich. Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation [M]. London: Taylor & Francis, 1997. 60~68
- F. Wyrowski, O. Bryndahl. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **5**(7): 1058~1065
- Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. New methods for improving the quality of laser beam shaping[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0116002
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0116002
- Dong Wang, Jian Zhang, Hongxin Zhang. Adaptive-weight iterative algorithm for flat-top laser beam shaping[J]. *Opt. Engng.*, 2012, **51**(7): 074301
- Jiang Pengzhi, Ma Haotong, Yuan Lingfeng *et al.*. Shaped beam of arbitrary size with adaptive optics based on stochastic parallel gradient descent algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1202008
蒋鹏志, 马浩统, 袁凌峰等. 基于并行梯度下降算法的自适应任意口径光束整形[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1202008
- Harry J. Levinson. Principles of Lithography[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010. 160~161
- Burn J. Lin. Optical Lithography: Here Is Why [M]. Bellingham: SPIE Press, 2009. 139~140
- J. S. Liu, M. R. Taghizadeh. Iterative algorithm for the design of diffractive phase elements for laser beam shaping[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1463~1465

栏目编辑:张腾