

文章编号: 0253-2239(2005)04-533-5

掩模分形提高光刻边缘锐度的研究^{*}

湛廷政¹ 吕海宝¹ 高益庆² 漆新民² 罗宁宁²

(¹ 国防科学技术大学仪器系, 长沙 410073)
(² 南昌航空工业学院测控系, 南昌 330034)

摘要: 针对电寻址空间光调制器制作灰度掩模过程中, 精缩透镜的低通滤波特性导致灰度掩模边缘锐度下降的问题, 提出了掩模分形技术。对一幅高频灰阶掩模图形, 按固定的或可变的低频采样。低频掩模的每个周期中, 只包含原掩模图形多个周期中的一个抽样。通过实时掩模技术, 将多个低频掩模按顺序曝光, 从而恢复出原高频掩模图形。制作二元光栅时, 分形掩模技术可使透镜造成的高频能量相对损失由 35.23% 降低至 6.09%, 同时, 可将部分低频能量搬迁至中高频, 较好地改善了灰阶掩模图形的边缘锐度。分形掩模还可以变多灰阶复杂掩模为简单的二元掩模, 简化掩模的设计与实现, 同时消除屏幕刷新率对掩模制作的影响。

关键词: 应用光学; 灰度掩模; 掩模分形; 边缘锐度; 光刻

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A

Research of Mask Division for Improving the Edge Sharpness of Photolithography

Shen Tingzheng¹ Lü Haibao¹ Gao Yiqing² Qi Xinmin² Luo Ningning²

(¹ Department of Instrument, National University of Defense Technology, Changsha 410073)
(² Department of Measurement and Control, Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034)

Abstract: A new technique of mask division for improving the sharpness of mask edge is put forward, which can be used to solve the lowpass filtering problem of the reduction lens in the system of mask fabrication with electrically addressed spatial light modulators. A mask image with high frequency is sampled with fixed or variable low frequency. In each period of the low frequency mask, only one part of the initial mask is included. Using real-time mask technique, multiple division masks are exposed sequentially and the high frequency mask is restored. For fabrication of binary grating, the relative lost efficiency caused by aperture limit of the lens can be decreased from 35.23% to 6.09%. And part of the low frequency energy is moved to the middle and high frequency. The sharpness of the mask edge is ameliorated evidently. Using division mask, complex shape mask or multi-level mask can be changed into binary mask, which is easy to be designed and realized. Moreover, the transition of multi-level gray to binary, that is, black and white, can eliminate the disturbing effect of the refresh rate of screen.

Key words: applied optics; gray-mask; mask division; edge sharpness; photolithography

1 引 言

在采用电寻址空间光调制器制作灰度掩模的系统中, 由于像素尺寸不可能做得太小, 因此, 必需采用精缩投影光学系统。而投影物镜的通光孔径有限, 使透镜变成一个通低频、阻高频的低通滤波器。当电寻址空间光调制器的出射面与精缩系统物镜之间的距离较大时, 一些代表掩模精细结构信息

的高频衍射级次丢失, 因而造成曝光图形的边缘模糊, 光刻分辨率下降。采用透射式液晶 (Liquid crystal display, LCD) 作为光调制器时, 可以通过减小透射式液晶与透镜组之间的距离降低高频损失。但透射式液晶像素的占空比较低, 通常在 70% 以下, 影响了掩模制作的精细度。采用高占空比的数字微镜器件 (Digital micromirror device, DMD) 作为

^{*} 江西省自然科学基金 (0412027) 资助课题。

作者简介: 湛廷政 (1972~), 男, 江苏赣榆人, 博士, 主要从事光电测试、精密仪器设计以及微光学器件制作与应用技术的研究工作。E-mail: dfzt2001@163.com

收稿日期: 2004-03-16; 收到修改稿日期: 2004-09-20

光调制器时,占空比大于 90%,可以有效地解决像素之间黑栅的影响。但由于数字微镜器件是反射式器件,入射光和反射光在同一侧,限制了它和精缩透镜组之间的距离。

目前,国内外在提高光刻系统分辨力的波前工程^[1]方面做了大量研究,提出了相移掩模^[2,3]、离轴照明、光瞳滤波^[4~7]以及光学邻近效应校正^[8]等一系列方法,可以较好地解决掩模光刻投影分辨力与

焦深的问题,其特点对比如表 1 所示。但这几种方法主要用于提高已制作好的高频、小特征尺寸掩模版的曝光转印分辨力,不适于采用电寻址空间光调制器的实时变灰度掩模投影系统。本文根据电寻址空间光调制器制作灰度掩模的特点,研究了一种适用于电寻址空间光调制器的分形掩模制作技术,可以在较大程度上抑制因透镜通光孔径有限而引起的衍射高级次丢失,提高掩模边缘的精细度。

表 1 提高光刻分辨力的方法比较

Table 1 Comparison of the methods for improving photolithography resolution

Solutions	Principle	Advantages	Shortcomings
Phase-shifting mask	Adding or reducing a flat of transparent medium in the adjacent transparent region. Diffractive extension is decreased by phase difference and interference	Moving more energy to high orders to compensate the lost part. Improving the image contrast, focal depth and resolution	Different mask needs different phase-shifting mask
Abaxial illumination	Importing oblique angle to change the function of illumination, then the transfer function can be changed.	The contrast and focal depth are improved.	Increasing defocus and decreasing the transfer function
Pupil filter	Putting filter on the plane of the mask frequency spectrum to improve the frequency spectrum.	Not only the focal depth is increased, but also the resolution of photolithography is improved.	Different mask needs different filter
Optical proximity correction	Adding serif on the edge of the mask lines to realize compensation or correction	The edge acuity of the mask photolithography can be improved.	Computation is complex and new aberration may be imported easily.

2 分形掩模原理

由光栅衍射的原理可知,频率越高,高能量衍射级与 0 级之间的夹角越大;频率越低,高能量衍射级与 0 级之间的夹角越小。对一幅高频灰阶掩模图形,按固定或可变的低频周期采样。将一个高频掩模图形分解成多个低频掩模,在空间域或时间域交错叠加,叠加后的掩模图形刚好与原高频掩模图形完全相同。低频掩模的每个周期中,只包含原高频掩模图形多个周期中的一个抽样,如图 1 所示。通过实时掩模^[9,10]技术,将多个低频掩模按顺序曝光,等效成原高频掩模的一次曝光效果,从而恢复出原高频掩模图形。

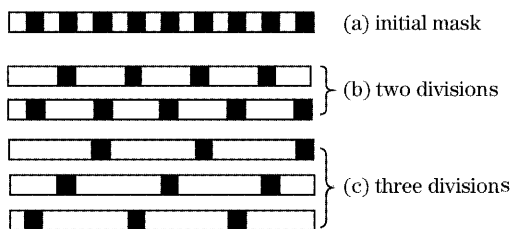


图 1 掩模分形原理图

Fig. 1 Sketch of mask division

由于光栅在微光学掩模制作中具有代表性,因此,本文将主要以光栅为例,分析分形掩模的原理和

作用。对于二元振幅光栅,设光栅周期为 T ,占空比为 $1:N$,其透射调制函数为

$$t(x) = \sum_m \delta(x - mT) * \left[\text{rect} \left(\frac{x}{T} - \frac{1}{N} \right) \right], \quad (1)$$

其中 $*$ 为卷积符号。则单色平面波透射后得到的角谱为

$$F\{t(x)\} = \sum_m \delta \left(f - \frac{m}{T} \right) \times \left[\exp \left(\frac{-j\pi T f}{N} \right) \cdot \frac{\sin(\pi T f / N)}{\pi T f} \right]. \quad (2)$$

二元振幅掩模各衍射级的衍射效率

$$I_m = a_m \cdot a_m^* = \left[\frac{\sin(\pi T f / N)}{\pi T f} \right]^2. \quad (3)$$

根据上式可计算出在理想情况下,占空比为 $1:2$ 时,二元振幅掩模各衍射级的衍射效率之和应为 50%,且偶级次衍射效率为 0。如表 2 所示, η_1 代表 0 级和 ± 1 级衍射能量之和; η_{2N} 为接收到的 2 级以上衍射能量; η_{tot} 为总的衍射能量; η_{rec} 为接收到的衍射总能量; η_{lost} 为损失的衍射能量,且 $\eta_{\text{lost}} = \eta_{\text{tot}} - \eta_{\text{rec}}$; N 为可接收的最大衍射级数; θ_N 为 $\pm N$ 级对应的衍射张角。若掩模制作系统的最大可接收衍射级取 ± 7 级,则包括 0 级在内的共 15 个衍射级的衍射效率之和为 48.33%。在 48.33% 的接收能量中,0 级和 ± 1 级衍射

分量占了绝大部分,约为45.26%;而接收的中高频能量较低,仅占3.07%。可见,即使取到±7级,仍有1.67%的能量因衍射受限而丢失,丢失部分约占二级以上中高频能量之和的35.23%。由于损失的能量是边缘高频部分,而不是整体幅值衰减。因此,这部分能量损失对边缘锐度的影响较大。

表2 掩模分形对衍射效率的影响

Table 2 Effect on diffraction efficiency caused by mask division

Mask	Initial mask	Three division
Period	d	$3d$
Duty-ratio	1:2	1:6
N	±7	±21
θ_N	$\arcsin(7\lambda/d)$	$\arcsin(7\lambda/d)$
$\eta_{\text{tot}}/\%$	50	50
$\eta_{\text{rec}}/\%$	48.33	48.48
$\eta_1/\%$	45.26	23.52
$\eta_{2N}/\%$	3.07	24.96
$\eta_{\text{lost}}/\%$	1.67	1.52
$\eta_{\text{lost}}/\eta_{2N}/\%$	35.23	6.09

从表2可见,对于占空比为1:2的掩模图形,采用三分形,如图1(c)所示,则占空比改为1:6。用占空比为1:2时可接收的衍射级对应的最大衍射角作为精缩透镜的视场张角,可计算出占空比为1:6时对应的可接收最大衍射级数为±21级。三次曝光叠加,最大衍射级取±21级时,总的叠加衍射效率为48.48%,而0级和±1级衍射分量所占的衍射效率仅为23.52%。大部分偶级次衍射获得了能量,且二级以上中高频部分衍射能量占总接收能量的24.96%,丢失衍射级的能量仅占全部中高频能量的6.09%。与原掩模相比,分形后的高频衍射能量损失下降了80%以上。如图2所示,分形后单张掩模的0级和±1级衍射效率明显低于分形前的衍射效

率,但±2级以上的大部分衍射级效率得到增强,相当于原0级和±1级的部分能量被搬迁至±2级以上的衍射级。上述数据分析表明,通过掩模分形曝光,可大大增强携带边缘信息的中高频分量,提高透镜可接收的衍射级数量,降低因衍射受限造成的边缘模糊,提高掩模光刻的横向分辨率。

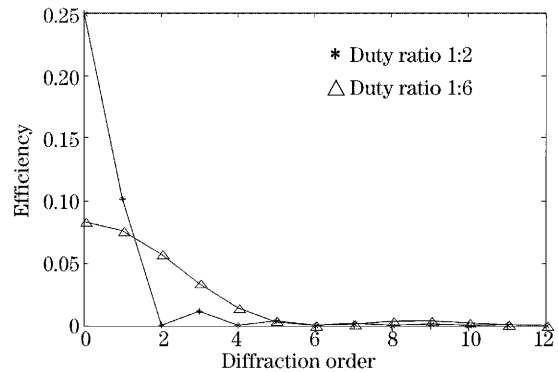


图2 不同掩模分形下的衍射效率比较

Fig. 2 Comparison of diffraction efficiency for different division of grating mask

对于振幅光栅,还可以通过傅里叶展开分析掩模分形对光刻边缘锐度的影响。假设由于衍射受限,只有0,±1,⋯,± N 级衍射参与成像, N 为可接收的最大衍射级次。令 $M=(N+1)/2$ 。同样以二元振幅光栅为例,其透过率函数的傅里叶展开式为

$$t(x) = \frac{1}{2} +$$

$$(-1)^{m+1} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{2}{(2m-1)\pi} \cos[(2m-1)\omega x] \right\}, \quad (4)$$

式中 m 为非0整数; $\omega = 2\pi f/\lambda$, f 为焦距。

利用(4)式仿真,可得 N 分别为7,11,21级时的光调制分布如图3所示。

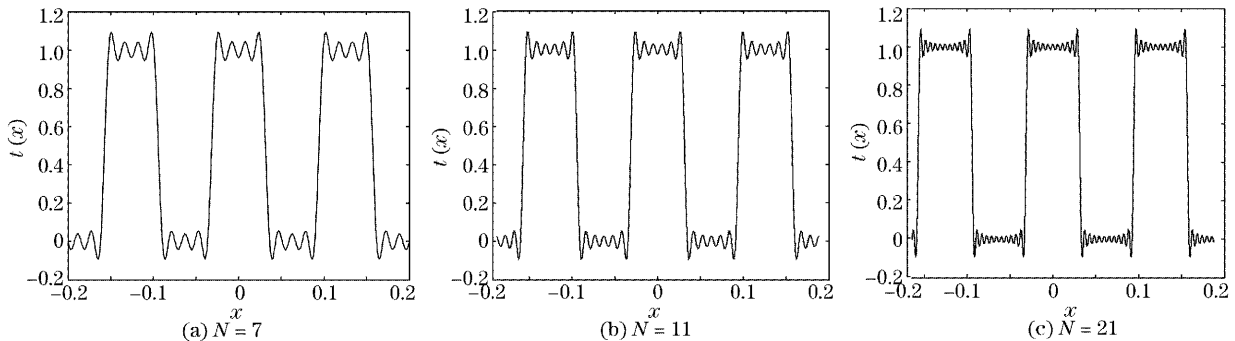


图3 不同接收衍射级次下的透过率

Fig. 3 Transmissivity on different received-diffraction orders

从图3可以看出,由于衍射受限,掩模边缘的部分信息丢失,造成原来需要曝光的地方曝光不足(线宽增加),不需曝光的地方(黑线)也有光透过,从而

导致掩模曝光图像失真。最大可接收的衍射级次越低,失真度越大;可接收衍射级次越高,边缘的锐度越好,与原始掩模图像越接近。对于衍射受限问题,

提高精缩物镜的通光孔径,并采用掩模分形曝光技术,使绝大部分衍射级都参与成像,可以明显减小该项误差。

3 掩模分形原则和方法

根据电寻址空间光调制器的工作原理和结构特点,可确定分形原则如下:

- 1) 分形主要针对特征尺寸较小的掩模图形,如最小特征尺寸小于四个像素大小的掩模;
- 2) 分形后的各掩模图形不必具有周期性;
- 3) 分形掩模数量由掩模图形的复杂程度决定;
- 4) 分形不必拘泥于分形后的一个周期实现原掩模的一个特征尺寸。可以根据曝光强度的需要,将平面分形与纵向曝光深度相结合,减少分形掩模数量,提高曝光效率。

分形的具体实现方法有:周期放大分形法、台阶分形法及混合分形法等。图 4(a)给出了通过分频实现的周期放大分形示意图。下面以八台阶闪耀光栅为例,介绍台阶分形法。

1) 先将原灰度掩模图形按数字微镜器件像素量化,如图 4(b),或在设计位相掩模图形时,直接用数字微镜器件像素尺寸作为最小单位,进行优化计算。

2) 对量化后的掩模图形,按等灰阶 G 分层, G 为最高灰阶除以台阶数得到的各层灰阶均值。不能被台阶数整除的部分单独做一层或合到最后一层。如图 4(c),八台阶分层后可得到八个分形, MD1~MD8。

3) 把分形后原有灰度的离散块(相当于需要曝光的部分),全部用白色填充;无灰度的部分(相当于需要保留的部分),用黑色填充,如图 4(d)所示。可见,八台阶灰度掩模经过分形处理并二值化填充后,得到的是一组等周期的黑白掩模 M1~M7。

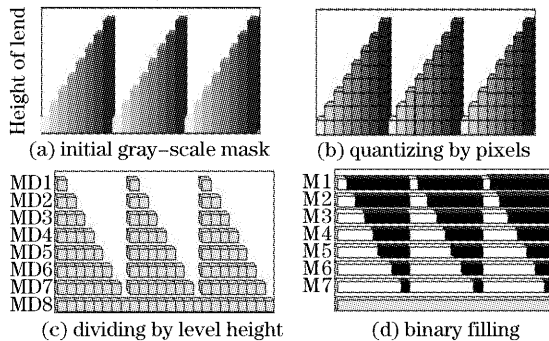


图 4 八台阶闪耀光栅掩模分形过程

Fig. 4 Process of mask division of eight-level blazed gratings

4) 用分形过程中得到的各层灰度值,确定各分形二值化掩模的曝光时间。

5) 当灰度掩模图形的周期较小时,如一个周期离散后只能用两、三个像素表示,此时,只按台阶分形,显然不会有较大改善。在这种情况下,应增加分形自由度,如可考虑采用横向多倍周期二次分形。

混合分形法,既可以是周期放大分形和台阶分形混合使用,也可以是周期放大分形和不规则分形结合使用。分形方法可以任意选择,规则的逻辑性决定了分形优化计算和掩模绘制的复杂程度。采用分形掩模,并不一定意味着掩模数量增加。如图 1 所示,周期性的二分形掩模和三分形掩模完全可以用一张掩模每次曝光时横向移动一个周期距离可得。由于电寻址空间光调制器像素之间的距离是固定的,因此,通过计算机控制数字微镜器件完成掩模图像的实时移动或切换^[6],前后两张掩模之间的位置对应由像素的尺寸决定,对准精度由像素的加工精度决定,不存在以往二元套刻掩模的对准难题。数字微镜器件的像素为微米级,加工精度在纳米级,再经过 20 倍以上的精缩,像素加工误差已降至亚纳米,对掩模对准影响可忽略不计。实时移动掩模曝光可大大提高周期性掩模制作的效率。

4 分形掩模的实验与分析

从图 4(a)可以看出,多台阶灰度掩模的一个周期内,存在多个灰度值。采用电寻址空间光调制器曝光时,如果不分形,可能会出现灰度变化间隔只有一、两个像素宽度,两两不同灰阶像素都可以构成频率较高的光栅的现象。而高频光栅会导致各衍射级之间的间距增大。采用空间滤波器滤除像素黑栅造成的衍射扩散时,会将边缘高频衍射的部分有效信号一起滤掉。图 5 给出了分别采用两个像素、四个像素和六个像素作为二元光栅周期的衍射照片,可以看出,降低光栅掩模频率可以降低衍射扩散。而图 5(b)相当于图 5(a)的二分形,图 5(c)相当于图 5(a)的三分形,因此,采用分形掩模后,掩模周期扩大数倍,各衍射级之间的间距将明显减小,大部分衍射能量集中在空间光阑的通光孔径以内,可降低精缩透镜的通光孔径影响。

根据以上分析结论,采用数字微镜器件作为电寻址空间光调制器,对二元高频光栅做分形测试。数字微镜器件的像素尺寸为 $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$,像素之间的间距(黑栅带) $1 \mu\text{m}$ 。采用 He-Cd 激光器作为

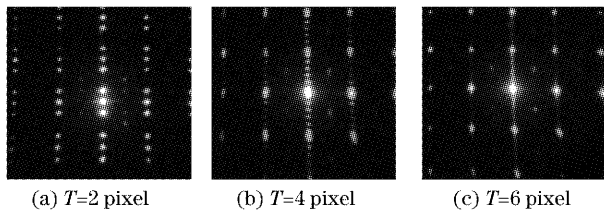


图 5 不同周期二元掩模的焦平面衍射照片

Fig. 5 Diffraction photos on focal plane of binary masks with different periods

光源, BP213 光刻胶作为光敏感材料。二元光栅的掩模周期为四个像素宽, 光栅占空比为 1:2, 未分形掩模曝光结果如图 6(a) 所示。采用周期放大分形法, 如图 1 中的三分频, 将整张光栅掩模图形分三次曝光完成, 分形掩模周期为 12 个像素宽, 占空比为 1:6。曝光结果如图 6(b) 和图 6(c) 所示。图 6(b) 图为单张分形掩模曝光结果, 图 6(c) 图为三张分形掩模曝光叠加后的结果。三张图均为光刻胶曝光后, 采用 Leica DM 显微镜 50 倍放大后拍摄的图像。对比可知, 未分形的曝光线条边缘锐度较差, 出现明显的斜坡, 占空比失调。分形后边缘陡度明显得到改善。图 6 中, 单张分形掩模曝光后由于背景反光较好, 拍摄较清楚。

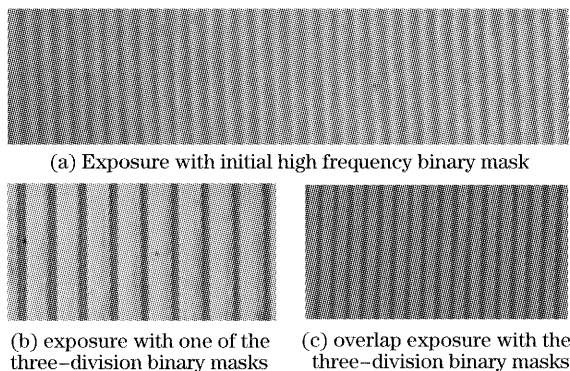


图 6 掩模分形曝光实验结果

Fig. 6 Experimental results of division mask exposure

4 结 论

理论分析和实验结果表明, 利用分形掩模技术可以有效地解决透镜有限孔径导致的衍射受限问题, 提高电寻址空间光调制器制作灰度掩模的光刻分辨力。以二元振幅光栅掩模为例, 原本只能接收 ± 7 级衍射的掩模制作系统, 通过掩模分形, 可接收的最大衍射级数增加至 ± 21 级。且 0 级和 ± 1 级衍射能量之和的 52% 被搬迁至中高频衍射级, 中高频衍射能量的损失也由原来的 35.23% 降至 6.09%。

掩模图形的边缘锐度得到明显改善。

另外, 分形掩模的二值化降低了数字微镜器件像素的翻转频率, 提高了一个刷新周期内数字微镜器件像素状态的一致性, 避免了多灰阶掩模中因灰阶不同而出现的任意两个像素都可能翻转频率不同, 任意两列都可能构成变频二元光栅的情况。分形掩模技术同样适用于采用透射式液晶等其它类型电寻址型空间光调制器的灰阶掩模制作系统。

参 考 文 献

- Levenson M D. Wavefront engineering from 500 nm CD to 100 nm CD[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3049**: 12~23
- Chen Xunan, Shi Jianping, Kang Xiqiao *et al.*. Study on phaseshifting filtering technique for improving photolithographic resolution of micropatterns[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 323~326 (in Chinese)
陈旭南, 石建平, 康西巧等. 提高微细图形光刻分辨力的相移滤波技术研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 323~326
- Zhou Chongxi, Feng Boru, Hou Desheng *et al.*. Research of attenuated phase-shifting mask and its encoding making method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1110~1113 (in Chinese)
周崇喜, 冯伯儒, 侯德胜等. 衰减相移掩模及其编码制作方法研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1110~1113
- Kang Xiqiao, Luo Xiangang, Chen Xunan. A study on improving imaging resolution of projection photolithography with pupil filtering[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(3): 9~11 (in Chinese)
康西巧, 罗先刚, 陈旭南. 光瞳滤波提高投影光刻成像分辨力研究[J]. *光电工程*, 2001, **28**(3): 9~11
- Xiao Fanrong, Yuan Jinghe, Wang Guiying *et al.*. Three-zone complex pupil filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 1~4 (in Chinese)
肖繁荣, 袁景和, 王桂英等. 三区复振幅光瞳滤波器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 1~4
- Deng Xiao-qiang, Wang Gui-ying, Xu Zhi-zhan. 3-D superresolution pupil filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(5): 459~462 (in Chinese)
邓小强, 王桂英, 徐至展. 三维超分辨光瞳滤波器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(5): 459~462
- Xiao Fanrong, Wang Guiying, Xu Zhizhan. The design of tunable phase-only pupil filter with uniaxial crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 378~382 (in Chinese)
肖繁荣, 王桂英, 徐至展. 单轴晶体相位型光瞳滤波器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 378~382
- Du Jinglei, Su Jingqin, Luo Kejian *et al.*. Fine correction of optical proximity effect by using gray-tone coding mask[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 518~524 (in Chinese)
杜惊雷, 粟敬钦, 罗克俭等. 用灰阶编码掩模实现邻近效应精细校正的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 518~524
- Peng Qinjun, Guo Yongkang, Chen Bo *et al.*. LCD real-time mask technique for fabrication of continuous microoptical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 220~224 (in Chinese)
彭钦军, 郭永康, 陈波等. 液晶实时掩模技术制作连续微光学元件[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 220~224
- Yan Shuhua, Dai Yifan, Lu Haibao *et al.*. Manufacturing system for gray-scale masks based on the spatial light modulator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 45~47 (in Chinese)
颜树华, 戴一帆, 吕海宝等. 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 45~47