

文章编号: 0258-7025(2002)09-0850-05

# 离焦激光直写光刻工艺研究

李凤友, 卢振武, 谢永军, 张殿文, 裴 苏, 赵晶丽

(中国科学院长春光学精密机械和物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130021)

**提要** 采用理论计算和光线追迹分析了激光直写光刻中离焦对写入焦斑光场分布的影响, 使用四轴激光直写设备开展了离焦激光直写光刻工艺实验, 实验和理论计算及光线追迹的结果吻合得很好。利用离焦激光直写光刻方法制作了光栅和分划版, 测得实验结果达到工艺要求。

**关键词** 激光直写光刻, 离焦写入, 四轴激光直写系统

中图分类号 TN 247; TN 305.7 文献标识码 A

## Photolithographic Fabrication Techniques by Using Defocusing Laser Direct Writing

LI Feng-you, LU Zhen-wu, XIE Yong-jun, ZHANG Dian-wen, PEI Su, ZHAO Jing-li

(State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
The Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130022)

**Abstract** The effect that the intensity of the writing spot relating to the amounts of defocus in the laser direct writing photolithography is analyzed based on the diffractive theory and the ray-tracing method, respectively. The photolithographic experiments with various amounts of defocus are developed by using four-axis laser direct writing system, which agree closely with the results of the theory or the ray-tracing method. The grating and reticle fabricated by this way are measured with atomic force microscope (AFM).

**Key words** laser direct writing photolithography, defocusing writing, four-axis laser direct writing system

## 1 引 言

激光直写光刻是当前制作光学掩模和衍射光学元件常用的光刻技术之一, 同电子束光刻(包括电子束直写)相比, 具有制作成本低、写入速度快、操作简单、工作环境要求低等优点, 被视为有前途的光刻技术, 得到了广泛的发展<sup>[1-10]</sup>。

一般衍射光学元件和掩模的线宽是从几百微米到小于一个微米, 用单一尺寸的小光斑写入线条, 在制作大孔径( $> 100$  mm)且写入面积很大的光学元件时, 写入时间和制作周期会很长。为了提高写入效率从而缩短制作周期, 一些学者对激光直写的写入方法进行了优化<sup>[11-13]</sup>。William Goltsos 等用  $0.7$

$\mu\text{m}$  的光点以螺旋图样填充环带或以共心圆环重叠写入的方法制作二元透镜<sup>[12]</sup>。Yuen-Chuen Chan 等研究发现: 在两条线之间最佳重叠量约为 25%, 通常用  $3 \mu\text{m}$  的光点重叠写入元件, 更大尺寸的光点通过故意离焦来实现<sup>[13]</sup>。Takashi Nomura 等用聚焦激光束重叠写入光栅线, 确定重叠位移量是光束直径的一半, 光束直径通常小于栅线间距最小值的一半, 高精度的光栅线条要求光束直径是最小间隔的四分之一<sup>[14]</sup>。他们优化了重叠写入宽线条的技术, 节省了多余的写入次数, 但是, 优化的重叠写入方法要求重叠写入一次, 精确定位一次, 整个制作时间还是很长。同时也出现了带有多个聚焦物镜和物镜孔径光阑可调的激光直写系统<sup>[8, 14]</sup>, 根据元件的特征尺寸

收稿日期 2001-06-22; 收到修改稿日期 2001-08-20

基金项目 应用光学国家重点实验室基金、国家自然科学基金(60078006)资助项目。

作者简介 李凤友(1968—), 男, 博士, 主要从事衍射光学元件设计与制作研究, 激光直写光刻研究。E-mail: lifengyou@mailcity.com

来选择适当大小的写入光斑,这样可以减少重叠写入的次数,但大多数衍射光学元件的线条不是等宽的,不可能在写入过程中时时调换物镜和调整孔径光阑大小来改变写入光斑尺寸,宽线条还要采用重叠写入方法实现。

另一种节省写入时间的有效途径是对写入光斑尺寸进行调制,Cynthia L. Vernold 等用四轴激光直写设备制造衍射光学元件时指出,通过控制写入光束的激光功率级次和离焦量,单次扫描能够写入宽为  $0.75 \sim 200 \mu\text{m}$  范围的线条<sup>[15]</sup>。离焦写入方法可以通过故意离焦来连续地改变写入光斑尺寸,大幅度地减少写入次数,但需要激光直写设备具有高精定位的  $Z$  轴,以实现写入光斑尺寸的精确控制。

我们注意到一些学者提到离焦写入方法<sup>[13,15]</sup>,但是都没有给出离焦写入的具体研究内容。本文基于中国科学院长春光机所自行研制的四轴激光直写系统,对写入物镜光学系统进行了光线追迹和标量理论模拟,分析了在不同离焦情况下,焦斑尺寸和能量分布的变化,采用故意离焦的方法在涂有光刻胶基片上进行写入线条的工艺实验研究,理论分析和实验结果基本一致。

## 2 四轴激光直写系统

四轴激光直写系统具有极坐标和直角坐标写入两种功能,可在平面和曲面基片上制作旋转对称的、非旋转对称的微光学组件,如图 1 所示。

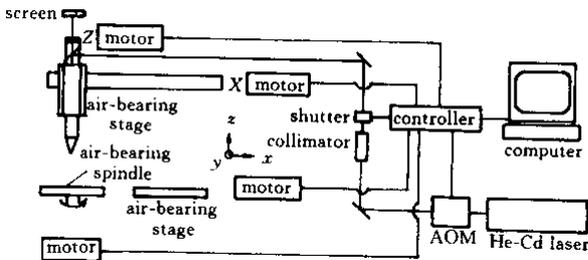


图 1 四轴激光直写系统结构草图

Fig. 1 Schematic of main components of four-axis laser direct writing system

系统采用  $150 \text{ mW}$  He-Cd 激光器 ( $\lambda = 442 \text{ nm}$ ) 发出的细光束经声光调制后,扩束到  $15 \text{ mm}$  并引导到光刻头上,由写入物镜聚焦到工件表面,写入物镜可换。 $X, Y, Z$  轴选用空气轴承导轨,步进电机驱动,压电系统微位移驱动,并采用光栅尺作为实时测

量进行闭环控制和修正。直角坐标写入的最大光学组件为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ,极坐标写入组件最大口径为  $\phi 400 \text{ mm}$ , $Z$  轴有效行程为  $50 \text{ mm}$ 。 $X, Y$  在  $200 \text{ mm}$  内位移精度为  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ , $Z$  轴在  $50 \text{ mm}$  内位移精度为  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

写入系统由一台 PC 机控制,在平面基片上写入图形时,将涂有光刻胶的基片放置在  $Y$  轴平台,调整  $Z$  轴上下移动使激光束聚焦到胶面上,光刻头沿  $X$  轴扫描,载有基片的平台可沿  $Y$  轴扫描,同时控制激光强度写入全部可编程的二维曝光图案。工艺研究中采用  $4 \times$  聚焦物镜,实验目的是探究不同离焦量下写入线条的宽度变化,使用表面粗糙度很好的玻璃材料 K9 作为基底。

## 3 理论计算和光线追迹分析

根据标量衍射理论,先对激光直写光刻中的两个重要参数写入焦斑大小和焦深进行计算。设入射到写入物镜的激光振幅分布是  $U_0(r) = \exp(-r^2/w_0^2)$ ,则在写入物镜后焦面上的光点振幅分布为

$$U(\rho, \theta) = \frac{\exp(i\pi\rho^2/\lambda f)}{i\lambda f} \int_0^a U_0(r) \times 2\pi r J_0(2\pi r\rho/\lambda f) dr \quad (1)$$

其中入射光束半径  $w_0 = 7.5 \text{ mm}$ ,写入物镜焦距  $f = 50 \text{ mm}$ ,通光孔径半径  $a = 7.5 \text{ mm}$ 。由(1)式得到:在不同光束直径与通光孔径比值的条件下,焦面光点的尺寸变化曲线如图 2 所示。

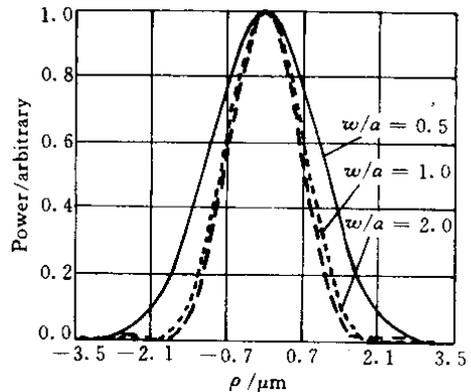


图 2 写入焦点光强的分布曲线

Fig. 2 Intensity distribution of writing spot

由图 2 可知,当光束口径与通光口径比值等于 1 时,写入焦斑的强度分布接近爱里斑分布,焦斑直径近似地被描述为

$$2R = \frac{2k_1\lambda}{NA} \quad (2)$$

根据瑞利判据得到焦深的公式

$$DOF = \frac{k_2\lambda}{NA^2} \quad (3)$$

式中  $NA$  为写入物镜的数值孔径,  $k_1, k_2$  为与工艺条件有关的参数, 通常对于平面波入射到矩形孔径  $k_1 = k_2 = 0.5$ , 圆形孔径  $k_1 = k_2 = 0.61$ ,  $\lambda$  为激光波长。对于  $4\times$  写入物镜  $NA = 0.15$ ,  $d \approx 3.59 \mu\text{m}$ ,  $DOF \approx 11.98 \mu\text{m}$ 。

然后, 计算出离焦写入时光刻胶层内的光场分布。在胶层较薄 ( $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ) 基底材料与光刻胶

匹配的情况下, 忽略基片上表面反射到胶层内的光和光刻胶吸收对光场分布的影响, 则入射到胶层内的光振幅分布<sup>[7]</sup>

$$U(\rho, z) = \frac{2\pi \exp[i\pi\lambda(f+\delta)\rho^2]}{i\lambda(f+\delta)} \int_0^a U_d(r) \times \exp\left[-i\frac{\pi\delta r^2}{\lambda(f+\delta)}\right] J_0(2\pi\rho r) r dr \quad (4)$$

其中  $\rho$  为频谱面上的半径,  $\delta = \delta_0 + z/n$  为离焦量,  $\delta_0$  为焦点到胶层上表面的距离, 焦点在胶层内  $\delta_0$  为负数,  $z$  为胶层上表面到胶层内观察点的深度。确定胶层深度  $z$  值后, 由(4)式得到不同离焦量胶层内光强的径向分布(图3)。

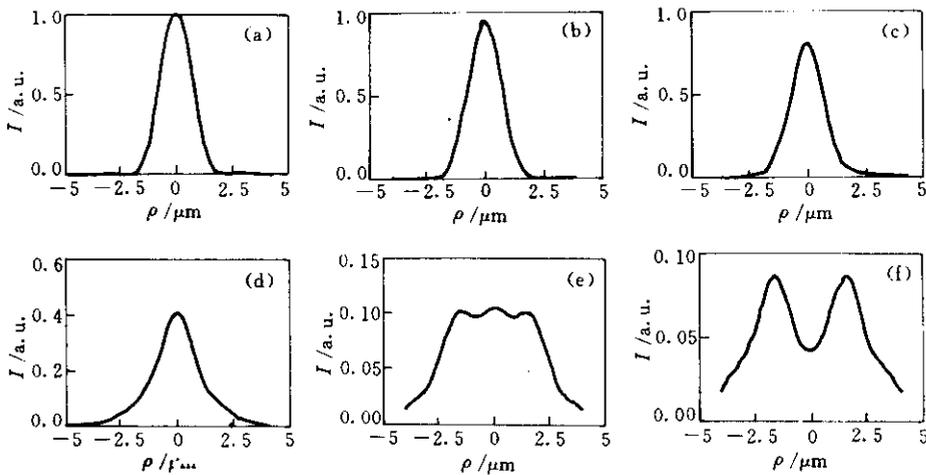


图3 不同离焦量情况胶层下表面光强分布

(a) 无离焦 (b) 离焦量  $5 \mu\text{m}$  (c) 离焦量  $10 \mu\text{m}$  (d) 离焦量  $20 \mu\text{m}$  (e) 离焦量  $30 \mu\text{m}$  (f) 离焦量  $35 \mu\text{m}$

Fig.3 Intensity distribution in the second surface of resist with defocusing amounts

(a) without defocusing ;(b) defocus  $5 \mu\text{m}$  ;(c) defocus  $10 \mu\text{m}$  ;(d) defocus  $20 \mu\text{m}$  ;(e) defocus  $30 \mu\text{m}$  ;(f) defocus  $35 \mu\text{m}$

其次, 根据聚焦物镜的实际光学系统, 使用光学软件 ZEMAX 进行光线追迹, 得到了不同离焦位置下焦斑的强度分布变化曲线(图4)。

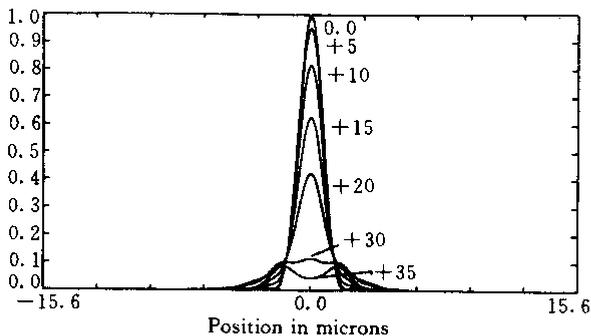


图4 在不同离焦量位置焦斑强度的分布曲线  
(光线追迹法)

Fig.4 Intensity distribution of the various defocused spot in ray tracing

从图3和图4看到: 1) 理论计算同光线追迹的结果几乎是相同的, 验证了用(4)式描述光场分布的正确性。2) 随着离焦量的增加, 中央光强逐渐减弱, 光斑径向尺寸变大。3) 当离焦量很大时, 中央强度减弱的同时, 边缘强度缓慢变化, 这样光点在光刻胶写入线条, 显影后的线条侧壁不陡直。4) 当离焦量超过某一个值时, 强度分布出现凹陷, 写入单线变成两条且质量很差。

## 4 工艺实验

实验采用 Shipley 公司最新的 Microposit S1805 正性光刻胶, 在 K9 基片上以  $2000 \text{ r/min}$  旋转速度涂布光刻胶, 胶膜厚  $0.9 \mu\text{m}$ , 基片放在烤箱内  $90^\circ\text{C}$  烘烤  $30 \text{ min}$ 。设计系统焦斑衍射极限尺寸为  $3.6 \mu\text{m}$ , 由焦斑扫描 Ronchi 光栅法<sup>[16,17]</sup>测得实际焦斑尺寸

约为  $4.4 \mu\text{m}$ 。利用光斑在  $0.9 \mu\text{m}$  厚光刻胶上写入单线,获得线宽为  $4.67 \mu\text{m}$ ,如图 5 所示。

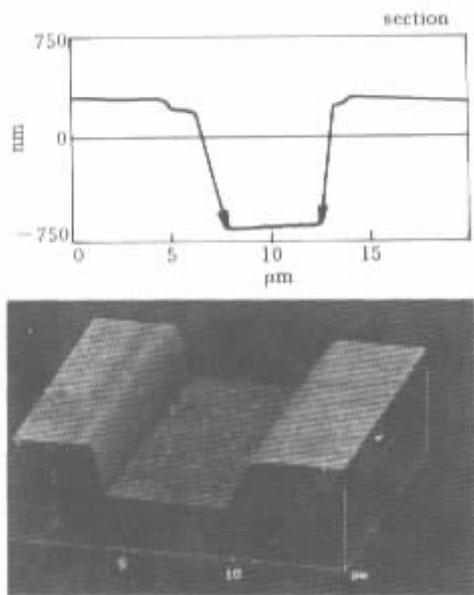


图 5 焦斑在光刻胶上写入的单线 线宽  $4.67 \mu\text{m}$ (AFM)

Fig.5 Isolated line with linewidth  $4.67 \mu\text{m}$  obtained by spot writing on resist (AFM)

从图 5 看到,线条非常直,侧壁很陡且十分光滑,经过腐蚀或离子束刻蚀后,在基片上也能获得很好的线条,线条两侧有个极小的缺口,是由于光斑的一级衍射光所产生的,可通过控制显影条件或提高曝光阈值消除一级衍射的影响。

下面用实验来确定线宽与离焦量的关系。调节 Z 轴使写入焦点在基片表面之上,以未离焦最佳曝光量(激光功率  $0.8 \text{ mW}$ ,扫描速度  $4.0 \text{ mm/s}$ )作为写入条件,每刻画一条线后,Z 轴位置下降  $2.0 \mu\text{m}$ ,直到再次出现离焦停止写入,光刻胶经显影后获得的每个线条,由原子力显微镜 (AFM) 测得线宽,给出其对应 Z 轴位置的变化曲线。然后,保持扫描速度不变,依次增加  $0.1 \text{ mW}$  激光写入功率,重复上述步骤,获得多组实验曲线。把实验曲线和光线追迹的写入光斑尺寸对离焦位置变化曲线进行比较,我们发现激光功率  $1.0 \text{ mW}$ ,扫描速度为  $4.0 \text{ mm/s}$  的实验曲线与光线追迹的曲线基本上吻合,如图 6 所示。

从图 6 可以看到,离焦量较小时线条宽度变化较小,离焦量越大,线条拓宽越大,离焦量在  $6.25 \sim 32.5 \mu\text{m}$  之间,实验结果与理论模拟结果基本吻合,但在离焦量小于  $6.25 \mu\text{m}$  时,实验获得的写入线宽比光线追迹法的焦斑尺寸要大一些,有两方面原因: 1) 实际系统焦点尺寸要比理论焦点大; 2) 离焦量较

小时即在焦深之内,焦斑强度远大于离焦量大的位置,在同样的显影条件下,曝光量过度从而线条展宽。实验还表明,减小激光功率,使离焦量很小 ( $< 6.25 \mu\text{m}$ ) 的位置最佳曝光,线宽变小,而大部分离焦位置曝光量不足,线条质量变差。当其他条件不变时,增加激光功率,在不同的离焦位置,线宽都会明显增加。此外,从上述的实验曲线和后面图 7 所示实验曲线可以看到,在离焦量小于  $6.25 \mu\text{m}$  范围内,两条曲线的线宽变化都很缓慢,线宽变化均在  $10\%$  以内,因此,由实验得到的写入物镜焦深就是  $12.5 \mu\text{m}$ ,与由 (3) 式计算焦深的值相差不到  $1 \mu\text{m}$ ,再次验证在最佳的写入条件下,实验结果与理论计算是一致的。

我们在光刻胶上直写了线宽为  $10 \mu\text{m}$  的分划版和周期为  $20 \mu\text{m}$  的光栅,来检验离焦写入方法的准确性。为提高线条分辨率,选用  $0.6 \mu\text{m}$  厚的光刻胶上写入光栅,X 轴精确定位栅线间距,Y 轴以  $4.8 \text{ mm/s}$  速度扫描。激光功率为  $1.5 \text{ mW}$ ,把 Z 轴调整到准确聚焦位置(误差在  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ),每刻画一条线,Z 轴下降  $1.0 \mu\text{m}$ ,直到离焦  $50 \mu\text{m}$  停止写入实验;显影使用 Microposit MF 319 显影液,用去离子水稀释比例为  $1:5$ ,在  $20^\circ\text{C}$  显影时间为  $5 \text{ s}$ 。由原子力显微镜取样测量线条宽度,获得了离焦量与线宽变化的实验曲线如图 7 所示。

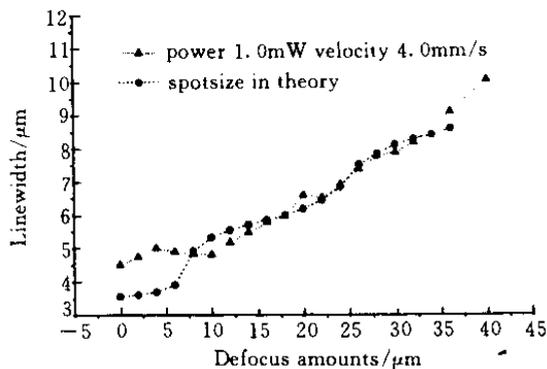


图 6 光斑尺寸和写入实验中胶面上的线宽随离焦量的变化曲线

Fig.6 Variation of the spotsize in theory and the linewidth in the photoresist in the experiment with the different defocusing amounts

采用离焦法写入宽为  $10 \mu\text{m}$  的线条,根据实验曲线写入光点尺寸约为  $8.0 \mu\text{m}$  左右,由图 7 可知要获得该尺寸的光点,离焦量应为  $20 \mu\text{m}$ 。在上述条件下,利用离焦法分别制作了分划版和光栅,图 8 为原子力显微镜测试光栅和分划版的照片。

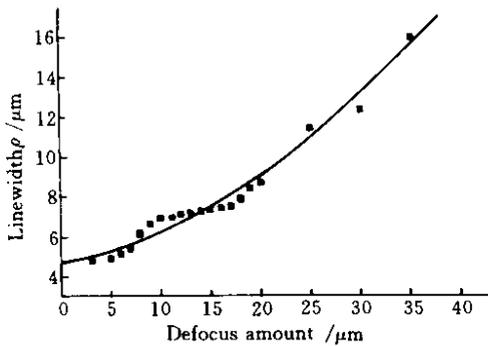


图7 线宽与离焦量的关系实验曲线

Fig.7 Experimental plot of linewidth  $\rho$  vs defocusing amount

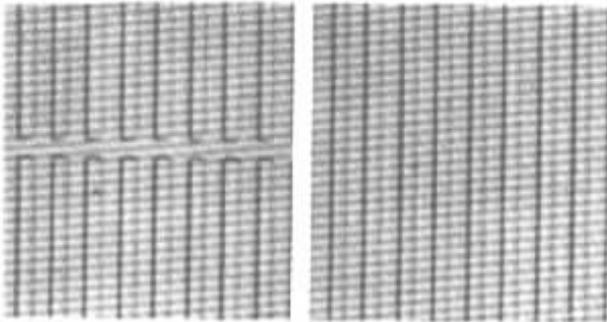


图8 分划版和光栅的 AFM 照片

(线宽为  $9.36 \mu\text{m}$ , 光栅周期为  $20.117 \mu\text{m}$ )

Fig.8 AFM photography of the reticle and grating

(linewidth is  $9.36 \mu\text{m}$  and grating period is  $20.117 \mu\text{m}$ )

从图8可以看到,十字交叉线垂直度和栅线直线度较好,测得栅线周期为  $20.117 \mu\text{m}$ ,误差为  $0.117 \mu\text{m}$ ;单线线宽为  $9.36 \mu\text{m}$ ,线宽误差在  $0.64 \mu\text{m}$ ,周期、线宽的变化均在10%之内。

## 5 结 论

离焦激光直写光刻方法具有一次写入宽线条、节省大量制作时间和减少定位误差的优点;不足之处是离焦量较大时,线条边缘陡度变缓。对边缘质量要求很高的线条,可以采用三次写入方法,边界的两次写入准确聚焦和精确定位,然后根据线条的宽度采用适当的重叠量和离焦量一次或多次写入,激光写入功率随之调整。这样既解决了线条边缘质量问题,也减少了写入元件的时间。实验表明离焦写入方法是激光直写光刻中一种行之有效的办法,用离焦激光直写光刻方法精确制作圆对称的衍射光学元件还需进一步的实验研究。

参 考 文 献

- Masamitsu Haruna, Masanobu Takahashi, Kohji Wakabayashi *et al.*. Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses [ J ]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**( 34 ) 5120 ~ 5126
- M. T. Gale, G. K. Lang, J. M. Raynor *et al.*. Fabrication of kinoform structures for optical computing [ J ]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**( 26 ) 5712 ~ 5715
- P. Langlois, H. Jerominek, L. Leclerc *et al.*. Diffractive optical elements fabricated by laser direct writing and other techniques [ C ]. *SPIE*, 1992, **1751** 2 ~ 12
- Ulrich Krackhardt, Johannes Schwider, Martin Schrader *et al.*. Synthetic holograms written by a laser pattern generator [ J ]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**( 4 ) 781 ~ 785
- Gregory P. Behrmann, Michael T. Duignan. Excimer laser micromachining for rapid fabrication of diffractive optical elements [ J ]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**( 20 ) 4666 ~ 4674
- Michael R. Wang, Heng Su. Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication [ J ]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**( 32 ) 7568 ~ 7576
- Yang Guoguang, Sheng Yibing. Research on laser direct writing system and its lithography properties [ C ]. *SPIE*, 1998, **3550** 409 ~ 418
- José Ramón Salgueiro, Juan Félix Román, Vicente Moreno. System for laser writing to lithograph masks for integrated optics [ J ]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**( 4 ) 1115 ~ 1123
- Jinglei Du, Fuhua Gao, Yongkang Guo *et al.*. Precompensation approach for improving the quality of laser direct writing patterns by a modified proximity function [ J ]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**( 3 ) 771 ~ 775
- John P. Bowen, Robert L. Michaels, C. Gary Blough. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation [ J ]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**( 34 ) 8970 ~ 8975
- Alexander G. Poleshchuck, Evgeny G. Churin, Voldemar P. Koronkevich *et al.*. Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure [ J ]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**( 8 ) 1295 ~ 1301
- William Goltsov, Sharlene Liu. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication [ C ]. *SPIE*, 1990, **1221** 137 ~ 147
- Yuen-chuen Chan, Yee-Loy Lam, Yan Zhou *et al.*. Development and applications of a laser writing lithography system for maskless patterning [ J ]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**( 9 ) 2521 ~ 2530
- Takashi Nomura, Kazuhide Kamiya, Hiroshi Miyashiro *et al.*. An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe [ J ]. *Prec. Eng.*, 1994, **16**( 4 ) 290 ~ 295
- Cynthia L. Vernold, Thomas D. Milster. Non-photolithographic fabrication of large computer-generated diffractive optical elements [ C ]. *SPIE*, 1994, **2263** 125 ~ 133
- Robert M. O'Connell, Cheng-Hao Chen. Ronchi ruling characterization of axially symmetric laser beams [ J ]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**( 30 ) 4441 ~ 4446
- Donald K. Cohen, Blake Little, Frank S. Luecke. Techniques for measuring  $1\text{-}\mu\text{m}$  diam Gaussian beams [ J ]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**( 4 ) 637 ~ 640