

文章编号:0258-7025(2005)04-0487-05

# 双、单光束互换光学头方光斑激光直写系统设计

陈林森, 解剑峰, 沈雁, 邵洁, 汪振华, 胡元

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 设计了一种具有方形光斑的新型激光直写系统,用双远心投影透镜组获得方形光斑并以逐点光刻模式运行,改善了衍射图形光刻质量,提高了系统运行效率。该系统具有双、单光束互换功能,双光束干涉用于衍射光变图像的直写,单光束进行二元衍射元件的光刻,实现了不同特性的衍射器件输出,从而解决了在同一幅光刻胶干板上同时进行具有微米量级干涉条纹的衍射光变图像和二元相位图形的直写问题。双光束干涉调制的衍射图像分辨率达到 2540 dpi,方光束点尺寸为 5~20  $\mu\text{m}$ 。给出了光变衍射图像和两台阶二元相位编码图形的制作结果。

**关键词:** 信息光学;直写;二元光学;衍射图像;干涉光学头

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A

## Design of Laser Direct Writing System with Changeable Double or Single Beam Optical Head

CHEN Lin-sen, XIE Jian-feng, SHEN Yan, SHAO Ji, WANG Zhen-hua, Hu Yuan

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract:** It is difficult to exposure the square unit phase structures with sizes of several microns on diffraction patterns by using Gaussian focus spot in a laser direct writing system. A novel changeable double or single beam optical head in the laser direct writing system has been designed and investigated. A method of using projection imaging optical configuration to obtain a square shape spot has been presented for improving the quality of exposed diffraction patterns and increasing the running efficiency by dot-by-dot exposure mode. Both the diffraction optical variable images with two beam interferential fringes on the dots and the binary phase encoding patterns can be simultaneously written on the same photoresist plate. The resolution of diffraction optical variable images can be achieved up to 2540 dpi, the size of square-shaped beams is adjustable within 5~20  $\mu\text{m}$ . The diffraction optical variable images and binary phase encoding patterns with two levels have been fabricated. The experimental results are given.

**Key words** information optics; direct writing; binary optics; diffraction image; interference optical head

## 1 引言

激光直写系统是用于制作光刻精密掩模的专用设备,随着对激光直写系统的研究发展,激光直写技术在集成电路掩模、精密电路布线以及光栅、码盘、鉴别率板等其他特殊图形掩模、大口径非球面光学元件检测、精密图像生成等方面越来越显示出重要作用,尤其在面积精密图形的制作方面,激光直写系统<sup>[1~6]</sup>是一种最有前途的技术手段,同样,具有双光束干涉的激光直写系统是衍射光变图像的主要光刻手段<sup>[7~9]</sup>。一般地,复杂的干涉条纹相位结构

在微观上由不同空频、不同条纹取向的光栅构成,从而,用双光束干涉产生的光栅像素点来光刻直写干涉条纹是一种更快捷的方法。

单光束直写对光强稳定、电子控制和机械的精度要求很高,如果光束焦斑为 1  $\mu\text{m}$ ,系统运行速度为 1~10 mm/s,用逐行扫描方式制作一个 10 mm $\times$ 10 mm 光栅,空频为 500 line pair/mm,时间至少需要 1.4 h,如果光刻更大面积,时间消耗将更大。对于线宽不是特别精细同时图形轮廓不是非常复杂的图形和台阶控制,单光束激光矢量化直写

收稿日期:2004-01-12;收到修改稿日期:2004-5-12

基金项目:教育部跨世纪人才基金资助项目。

作者简介:陈林森(1961-),男,江苏人,苏州大学信息光学工程研究所研究员,从事光信息与衍射器件、激光干涉光刻系统的研究。E-mail: lschen@suda.edu.cn

的优点是显而易见的。但是,对于高空频、具有复杂干涉条纹分布结构的衍射光变图像,如用单光束逐行直写,受高斯点光强分布的影响,不仅提高图形光刻精度存在困难,同时,系统的运行效率也很低。采用双光束干涉方法能有效提高衍射图像光刻时的运行效率<sup>[8]</sup>。如果系统以 $80\ \mu\text{m}$ 干涉光点光刻,并以 $20\ \text{dots/s}$ 的速度运行,则同样光刻制作一个 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 光栅,空频为 $500\ \text{line pair/mm}$ ,需要时间小于 $0.22\ \text{h}$ 。但目前激光衍射图像直写系统光刻图像的分辨率为 $317\sim 1270\ \text{dpi}$ ,对应光点的尺寸为 $80\sim 20\ \mu\text{m}$ ,采用高斯圆形光刻点,光刻点之间有约 $20\%$ 面积没有被光刻。

采用电子束刻蚀技术将二元相位编码图形与衍射光变图形的制作集成在一起的研究工作<sup>[9]</sup>已经有报道,其制作、设计成本高,周期长,应用上存在困难。因此,如何研制一种能同时支持二元相位编码光刻、又能进行衍射图像制作的新型激光直写系统是一项有意义的工作。

我们设计了具有双、单光束互换光学头来实现这两种不同特性的光学精密图像激光直写,提出用双远心投影透镜组获得均匀方形光斑,通过逐点像素光刻的方法,在同一幅图像上既可光刻衍射光变图像也可光刻二元相位编码图形。双光束系统采用了衍射光栅分光干涉光学头,可以产生最高 $1200\ \text{lines pair/mm}$ 等间距的干涉条纹像素点,衍射光变图像的分辨率可达 $3000\ \text{dpi}$ ,单光束实现单元相位尺寸 $5\ \mu\text{m}$ 以上的二元相位结构的直写。衍射图像和相位结构图像均被转换成点阵控制的数据结构,给出了衍射图像和两台阶二元相位编码图形的光刻制作结果。

## 2 结构设计

对于数字化衍射光变图形和二元相位编码图形,在进行相位结构数据计算时,最小计算单元是方形像素。图1(a)为典型的衍射光变图形的浮雕相位微观结构的放大图,在每个光点上均调制了不同取向、不同空频的干涉条纹,图1(b)为二元相位编码图形的局部相位结构。显然,用方形像素作为光刻点来逐点光刻最小结构单元,有利于提高衍射光变图形和二元相位编码图形中的曝光面积,改善光点内的曝光均匀性和提高光刻运行效率。对于复杂的衍射图像(如衍射分层图形和3D图像),描述波阵面所要求的数据量很大,理论上要求的光点更细。

一般地,用于数字化3D衍射图像的光点应达到 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ ,内含周期为 $1\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 的多组干涉条纹,这样,对应的图像分辨率为 $3000\sim 2540\ \text{dpi}$ ;同样,以标量波理论为基础的二元相位编码元件的最小单元尺寸为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ ,如果采用单高斯光点光刻,将导致光斑内浮雕相位分布不均匀,相位结构的衍射效率低。

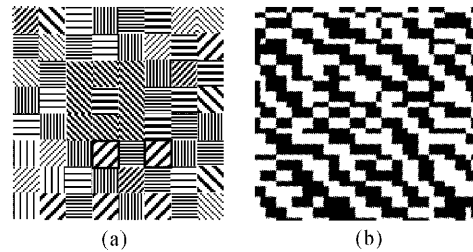


图1 浮雕相位结构放大示意图  
(a) 衍射光变图形; (b) 二元相位分布  
Fig. 1 Enlarged schemes of diffraction structures  
(a) diffraction optical variable image; (b) binary phase

由于激光束是圆形高斯光斑,作为比照,先计算高斯细光束的焦斑与焦深情况,这两个参数主要取决于使用波长和显微物镜的数值孔径(NA),对于基模光束

$$R = k_1 \lambda / \text{NA}, \quad (1)$$

$$\text{DOF} = k_2 \lambda / \text{NA}^2, \quad (2)$$

其中 $k_1, k_2$ 为条件因子, $R, \text{DOF}$ 分别为实用分辨率和焦深。如果使焦斑小,焦深也随之变短,在实际应用中要兼顾焦斑和焦深。选择显微物镜的 $\text{NA} = 0.65, \lambda = 441.6\ \text{nm}$ ,系统的实用分辨率可达到 $1.0\ \mu\text{m}$ , $\text{DOF}$ 为 $2.2\ \mu\text{m}$ 。一般地,激光直写采用逐行扫描方式,细光点有利于光刻精细结构,但是,光

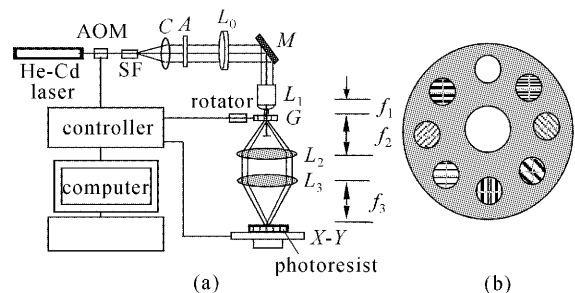


图2 具有双、单光束互换光学头的激光直写系统  
(a)激光直写系统结构示意图; (b)光栅盘G的放大图  
Fig. 2 Laser direct writing system with double and single beam changeable optical head  
(a) scheme of laser direct writing system;  
(b) disk of gratings

点的减小增加了其他不利因素。第一, 高斯型光强分布使光刻点上中央与边缘处的光强差别很大, 点内的光强不均匀; 第二, 焦深很小, 对调焦精度要求非常严格, 需要设计特殊的显微物镜; 第三, 当光刻点阵图像时, 如果采用逐行扫描, 则圆光斑使得线条边缘和拐角处圆滑化; 第四, 细光束光刻的运行时间很长, 用  $1.0 \mu\text{m}$  光点在快速模式下 (如 Heidelberg LDW66) 逐行扫描光刻  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  面积的时间为 34 h。

为此, 我们设计了采用干涉成像光学头的激光直写系统 [如图 2(a) 所示], AOM 为声光调制器, 作为高速光开关, SF 和透镜 C 组成扩束准直系统, 形成扩束光斑, M 为反射镜, 光束经过短焦距物镜  $L_1$  和由光栅盘 G、透镜组  $L_2, L_3$  组成的干涉光学头, 在光刻胶干板上形成光刻点。置于转盘上的一组具有不同空间频率的光栅元件 G 起分束作用, 见图 2(b), 与普通光栅不同, 这里专门研制的在  $441.6 \text{ nm}$  波长下体积型光栅 G 能将入射光束的 70% 以上光强分束在正、负一级衍射光上, 零级光强最小, 使用时将剩余零级光挡掉。旋转光栅转盘可选择不同空间频率的体光栅, 当旋转空位时, 形成单光束, 光栅盘 G 在其他光栅位置, 系统形成的是双光束干涉直写, 体光栅分光元件的转动不影响在光刻胶干板上光束合束与聚焦。

为了克服直接聚焦形成光点的缺点, 在图 2 系

统中增加了透镜  $L_0$ , 并与显微物镜  $L_1$  ( $\text{NA}=0.65$ ) 构成双远心投影缩小透镜组, A 为方形孔径光阑, 置于透镜  $L_0$  的前焦面, 经过远心成像系统, 缩小倍率为  $40\times$  的光阑像投影在体光栅 G 上, 对物方  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  以下的方孔, 属于严格的近轴成像, 实际检测的缩微投影透镜组的成像分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。如光阑尺寸为  $0.2 \text{ mm}$ , 则缩微方点为  $5 \mu\text{m}$ , 如光阑尺寸为  $0.4 \text{ mm}$ , 缩微方点为  $10 \mu\text{m}$ 。经过上述系统的光斑扩束和缩小成像, 方型光刻点内光强均匀, 同时, 显著改善了对光刻点的调焦要求。透镜组  $L_2, L_3$  的数值孔径 NA 将决定体光栅最大的分束角度。 $L_2, L_3$  的透镜组 NA 为 0.71, 因此, 所允许的体光栅最大空频为 748 lines pair/mm, 在光刻胶干板上形成的最小条纹间隔为  $0.67 \mu\text{m}$ 。由于光束有一定的扩散, 实际在光刻胶上形成的干涉条纹的最高空间频率为 1200 lines pair/mm。由于系统采用了光栅分束和透镜合束这种结构, 两束干涉光对于环境震动处于同步状态, 因此, 这种结构对环境的震动不敏感。

表 1 列出了双、单光束互换激光直写系统的一些基本参数。需要说明的是, 采用双远心投影光学结构获得缩微方点的代价是系统的光能利用率的下降, 由于激光束很细, 实际激光直写单点的时间仍然在微秒水平, 从使用角度上考虑, 上述设计是合适的。

表 1 具有双、单光束互换光学头的激光直写系统的基本参数

Table 1 Parameters of laser direct writing system with double and single beam changeable optical head

Write lens	NA= 0.65	NA= 0.40	NA= 0.25
Size of dot/ $\mu\text{m}$	5	10	20
Rate of exposure / (dot/s)	80	60	40
Dot width uniform/ $\mu\text{m}$	0.1	0.2	0.4
Position accuracy/ $\mu\text{m}$	1	1.5	3
Writing time for $2.54 \text{ mm} \times 2.54 \text{ mm/h}$	0.89	0.30	0.11
Frequency of grating / (lines/mm)	X	<1200	<1200
Angle of grating / ( $^\circ$ )	X	180	180

### 3 实验结果与讨论

为了比较采用不同强度分布干涉点光刻的衍射图像的衍射效率, 们通过光刻衍射光栅的方法来测定一级衍射效率。用具有高斯强度分布干涉光斑直写的衍射光栅一级衍射效率最高为 20%, 而采用方光刻点直写光栅的衍射效率提高到 25.2%~29.0%, 衍射效率提高的主要原因是光刻点内曝光均匀同时实际光刻面积增加。

以两台阶透射型相位元件为例, 相位角  $\varphi = 2\pi(n-1)h/\lambda$ , 获得高衍射效率相位结构的条件是台阶深度  $h$  应使得相位角满足  $\pi$  相位差, 在材料折射率  $n$ , 使用波长  $\lambda$  一定的条件下, 主要通过涂胶厚度、曝光功率与显影时间的控制来改变台阶高度, 因此, 严格控制台阶深度是必须的。图 3(a) 是经过 50 次迭代傅里叶变换运算<sup>[10~12]</sup> 编码成  $256 \times 256$  阵列两台阶相位数据 (局部), 图 3(b) 为  $10 \mu\text{m}$  单光束方点光刻形

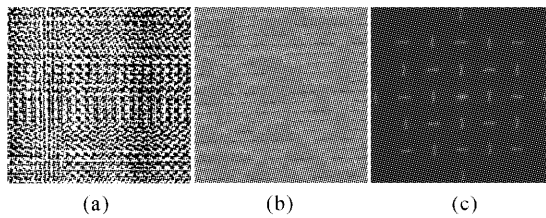


图3 采用方点光刻的二元相位结构与远场的再现像。  
(a) 二元相位结构图；(b) 相位结构的 SEM 照片；  
(c) 用 650 nm 再现远场衍射图形

Fig.3 Reconstructed pattern from binary phase structure etched by square spot. (a) binary phase structure; (b) SEM photo of phase structure; (c) reconstructed pattern under 650nm beam

成的相位结构扫描电子显微镜(SEM)照片,用650 nm 激光照射此二元相位结构,在远场输出的再现衍射像如图 3(c)所示,相位结构最终的一级光衍射效率达 31%,可以看到再现图像具有很好的质量和高信噪比,光场中线条的光强分布均匀。对于相同的二元相位结构,用单高斯点光刻的一级衍射效率仅为 15%。实验发现,对于方点光刻相位结构,通过浮雕深度控制,能够获得接近理论的衍射效率,对于高斯光束光刻的相位结构,浮雕深度的控制是非常困难的,不能获得更高的衍射效率。

图 4 为用双、单光束在同一个光刻胶干板上同时光刻衍射光变图像和两台阶二元位像结构的实验结果照片。激光波长为 441.6 nm,系统机械最高定位精度为 1  $\mu\text{m}$ 。整体图像的尺寸为 22 mm  $\times$  28 mm,图 4(a)中 2540 dpi 区域的覆盖面积为 50%,图 4(b)中 1270 dpi 的文字与线条的覆盖面积为 30%,二元相位结构所占面积约 8%~10%,整个图

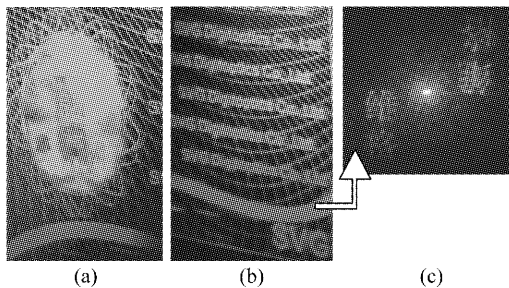


图 4 衍射光变图像和二元相位结构的实验结果。  
(a) 2540 dpi 光变图像；(b) 具有二元相位结构的  
衍射图像；(c) 再现图像

Fig.4 Experimental results of diffraction variable images and binary phase structures. (a) optical variable image with 2540 dpi; (b) diffraction pattern with binary phase structures; (c) reconstructed images

像光刻总时间为 9.5 h。用 10  $\mu\text{m}$  逐点光刻 2.56 mm  $\times$  2.56 mm 面积二元相位结构,所用的时间为 0.30 h。所有光刻数据被统一转换成自定义的光刻点阵数据结构 \*.arr,输入计算机,控制激光直写系统在光刻胶上逐点光刻,曝光量的控制精度为 1  $\mu\text{s}$ ,整个文件的尺寸近 100 Mb。

图 4(a)的衍射光变图像中图像区域的分辨率为 2540 dpi,具有同位异像效果,图 4(b)中的衍射线和文字分辨率为 1270 dpi,具有 2d/3d 视差,文字显示在表层的后面 2mm。图 4(a),(b)底部的波浪线是组合型二元相位分布,将多个 512  $\times$  512 点阵相位图拼接在一起形成一个较大尺寸的相位分布图,然后剪切成波浪形状,将相位结构转换成逐点光刻数据,直写成两台阶二元相位浮雕,用 650 nm 激光照射此二元相位结构,在远场输出的再现衍射像如图 4(c)所示,在再现光场上的零级光和噪声偏高,原因是在同一光刻胶干板上光刻了两种不同类型的衍射图像,对于二元相位结构的深度控制和衍射图像干涉条纹的曝光控制,二者的匹配要比单独使用一种光刻时浮雕深度控制的要求更高。

## 4 结 论

设计的具有方形光斑的双、单光束互换激光直写系统,实现了在同一光刻胶干板上直写高分辨率衍射光变图像,同时光刻两台阶二元相位结构,最小干涉光点尺寸为 8  $\mu\text{m}$ ,最小单光点为 5  $\mu\text{m}$ 。希望通过进一步的研究工作,在新型衍射图像和光束整形器件的设计制作中发挥重要作用。

## 参 考 文 献

- 1 H. P. Herzig. Ed., Micro: Optics Elements, Systems and Applications [M], Taylor&Francis Ltd., 1997
  - 2 Jose Ramon Salgueiro, Juan Felix Roman, Vicente Moreno. System for laser writing to lithograph masks for integrated optics [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(4): 1115~1123
  - 3 Kanti Jain. Lithography and photoablation systems for microelectronics and optoelectronics; importance of laser beam shaping in system designs [C], *SPIE*, 2002, **4770**: 1~12
  - 4 Andrei Y. Smuk, Nabil M. Lawandy. Direct laser writing of diffractive optics in glass [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 1030~1032
  - 5 A. G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. 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
  - 6 Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun *et al.*. Phololithographic fabrication techniques by using defocusing laser direct writing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 850~854
- 李凤友, 卢振武, 谢永军等. 离焦激光直写光刻工艺研究 [J].

- 中国激光, 2002, **A29**(9): 850~854
- 7 Chen Linsen, Xie Jianfeng, Shen Yan *et al.* Fabrication of 3D image Laser printing system with SLM [J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(5): 367~370  
陈林森, 解剑锋, 沈雁等. 基于 SLM 的三维图像激光光刻系统的研制 [J]. *激光与红外*, 2003, **33**(5): 367~370
- 8 Shao Jie, Chen Linsen. Improved ways of making OVDs with interferential laser direct writing technique [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(6): 626~629  
邵洁, 陈林森. 干涉型激光直写制作光学可变图像的优化方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(6): 626~629
- 9 J. Drinkwater, Z. Ryzi, C. Outwater. A new flexible origination technology based on electron beam lithography and its integration into security devices in combination with covert features based on DNA authentication [C]. *SPIE*, 2002, **4677**: 203~214
- 10 Philip Birch, Rupert Young, Maria Farsari *et al.*. A comparison of the iterative Fourier transform method and evolutionary algorithms for the design of diffractive optical elements [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **33**: 439~448
- 11 Marek Skeren, Ivan Richter, Pavel Fiala. Design and optimization considerations of multi-focus phase-only diffractive elements [C]. *SPIE*, 2004, **5182**: 233~242
- 12 Liu Fumin, Zhai Hongchen, Yang Xiaoping *et al.* Amplitude fitting to binary images reconstructed by kinoforms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 666~670  
刘福民, 翟宏琛, 杨晓苹等. 应用相息图再现二元图像的振幅配置法 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 666~670

## 10 ps 大能量卫星测距用激光器

本项目紧跟国际先进技术, 振荡级采用半导体激光抽运、半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模技术, 获得了 10 ps 左右稳定的锁模脉冲输出。利用成熟的氙灯抽运再生放大器及两级单通能量放大器, 实现了对 10 ps 宽度的全固态半导体可饱和吸收镜锁模激光脉冲的有效放大。该激光器最后输出的主要指标为: 波长 532 nm, 单脉冲能量 50 mJ, 工作频率 1~20 Hz, 发散角  $\leq 1$  mrad, 能量稳定度  $\pm 5\%$ 。

该激光器用于卫星测距, 可使测距精度提高到 2 cm 以内。

另外, 该激光器还可应用于激光雷达、激光光谱、非线性光学、光化学、光生物学等研究领域, 以及

激光打孔等微加工行业, 加工质量明显优于长脉冲激光的加工质量。

此激光器研制的项目来源于科技部, 项目编号为: JG-2000-5。目前此项目已通过科技部组织的专家验收。

<sup>1</sup>北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022  
<sup>2</sup>中国测绘科学研究院房山卫星观测站,  
北京 100039  
李 港<sup>1</sup>, 陈 檬<sup>1</sup>, 张炳元<sup>1</sup>, 瞿 峰<sup>2</sup>,  
卫志斌<sup>2</sup>, 刘乃玲<sup>2</sup>  
收稿日期: 2005-03-21