

一种二元整形元件激光直写方法的实验研究*

陈林森 邵洁 王雪辉 徐兵 解剑峰 沈雁

(苏州大学信息光学工程研究所, 苏州 215006)

摘要 为了实现具有复杂位相结构的二元光束整形元件,提出了采用方光点的激光直写系统来逐点光刻浮雕位相结构的方法,通过双远心投影缩微光路获得5~20 μm方点,光点尺寸对应于最小位相单元,从而获得了位相结构的高质量直写.分析了高斯光点和方光点位相单元结构对二元整形元件衍射效率的影响,方形两台阶二元整形元件的+1级衍射效率达到31%,给出了实验结果.

关键词 二元光学;衍射;位相编码;激光直写

中图分类号 O436.1 TH74 **文献标识码** A

0 引言

激光光束整形(Beam Shaping)技术能有效地控制空间域光场分布形成空间图像.在多种用于光束整形的光学器件中,二元光学元件由于其衍射效率高、体积小、设计灵活、便于集成等优点,成为光束整形技术的重要研究领域^[1-6].电子束(e-beam)和激光直写(LDW)^[2-4]是两种主要制作方法,前者刻蚀的分辨率高,但设备投资大,设计和制作费用昂贵,制作时间长;激光直写是一种相对快捷的掩膜生成方法,在用来制作线结构图形时,具有制作工艺简单、速度快、加工成本低和面积大的优点.

与光斑整形器件不同^[5],我们的工作旨在研究一种光束整形元件新的制作方法.如果采用高斯细光束扫描直写具有复杂二元位相结构,元件衍射效率受到光点质量、光束邻近效应和扫描方式的制约,同时,在直写系统的光刻控制方式上,用矢量化文件格式来控制具有复杂位相结构的二元整形元件也是不适合的,由于直写系统采用高数值孔径的显微物镜直接对光束聚焦,聚焦的调节要求极其严格.我们在研制双光束干涉激光光刻系统^[7]的基础上,提出了在系统中通过双远心投影缩微光路来获得均匀方形光刻点,使光刻点对应于位相最小结构单元,逐个方光点来激光直写二元整形位相分布的方法,与直接聚焦的高斯细光束相比,用新激光直写方法进行光刻,调焦要求得到显著改善,从而,提高了位相单元结构的光刻质量,光刻逐行扫描次数减少,系统控制技术的要求简化.文中还对高斯光点和方光点光刻的位相单元结构的二元整形元件的衍射效率进行了分析比较,用方点光刻的两台阶二元整形元件的+1级衍射效率达到31%,给出了光刻实验结果.

1 光束整形元件的位相结构计算

二元整形元件是纯位相型器件,设单位振幅为A的平行光入射器件上,在远场输出面光场的复振幅分布是二元位相器件位相结构函数的 $\exp[i\phi(u,v)]$ 傅里叶变换为

$$F(x,y) = FT\{A \exp[i\phi(u,v)]\} \quad (1)$$

二元整形元件的算法实质是已知输入光场和输出光场,求解二元位相分布问题.图1(a)中所示的输出像是用于数码相机自动聚焦测量的二元整形图像,它由多组相互正交的直线段构成,作为已知输出光场 $F(x,y)$ 逆向求解出 $\phi(u,v)$.

二元位相求解的算法很多^[8-12],我们采用GS改进算法通过多次迭代Fourier变换运算计算二元位相结构,一般地,二元整形元件的最小单元位相尺寸大于使用波长,因此,采用标量波理论计算元件的衍射效率,衍射效率的定义为

$$D_{\text{eff}} = \frac{\sum_{(x,y) \in \Omega} I_r(x,y)}{\sum_x \sum_y I_r(x,y)} \quad (2)$$

式(2)中的分子是再现目标图像内 Ω 的光强,分母是整个再现光场的光强.为验证了算法的正确性,在计算整形图像的位相结构之前,先用单光点目标图像计算其0- π 内的二元位相结构的衍射效率,50次迭代运算后,2、4和8阶位相结构的1级衍射效率分别是40.5%,81.0%和95.0%与理论结果相符.透射型元件位相角 ϕ 与浮雕深度 h 的关系为

$$\phi = 2\pi(n-1)h/\lambda \quad (3)$$

式中 n 为最终使用材料的折射率, λ 为照明光波长.例如, $\lambda = 650 \text{ nm}$,光刻胶 $n = 1.63$,则浮雕深度 h 为 $0.53 \mu\text{m}$,如最终材料是光学塑料(PMMA), $n = 1.43$,则 h 为 $0.61 \mu\text{m}$.如果将二元位相浮雕用电铸方法制在金属镍上,然后,在信息转移层($n = 1.52$)上压印,形成图1(a)所示的具有反射层的位相结构,则 $\phi = 4\pi nh/\lambda$,产生 π 位相的 h 为 $0.11 \mu\text{m}$,光

*教育部优秀跨世纪人才计划支持课题

Email:lschen@suda.edu.cn

收稿日期:2003-01-13

刻边缘陡峭度要求降低. 图 1(a) 为所需的整形元件在远场形成两维多组相互正交直线的光场分布, 对(a)图形进行迭代优化运算后, 得到图 1(b) 所示的二元位相分布(局部), 从放大图可看出, 经数字化后的位相最小单元是方形, 因此, 用方型光刻点对应于最小位相单元进行光刻是最合适的选择. 表 1 给出了对图 1(a) 图形经过 50 次迭代处理(2 台阶)后的二元位相分布的 +1 级衍射效率. 需要说明的是, 输出目标图形大小、整形光点分布以及在输出面上位置的不同, 经优化运算后的衍射效率会有不同.

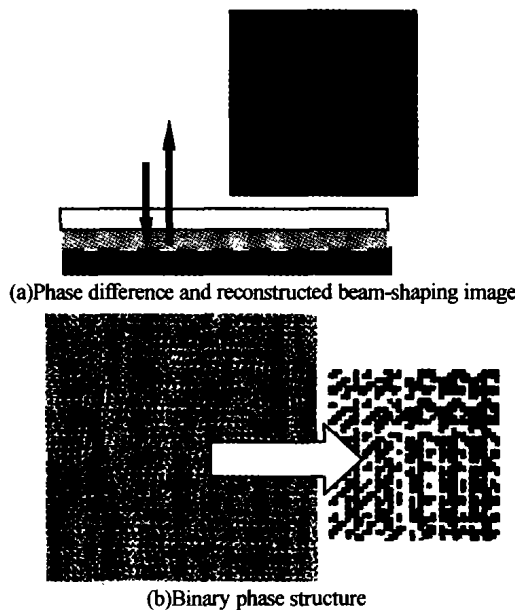


图 1 二元位相结构与再现象

Fig. 1 Binary phase structure & reconstructed image

表 1 不同位相单元结构 +1 级再现象的衍射效率

$E_{i,g}$	$E_{i,j}$	$E_{e,g}$	$E_{e,j}$
~ 18.1%	~ 35.2%	15.0%	31.0%

表 1 中 $E_{i,g}$ 、 $E_{i,j}$ 和 $E_{e,g}$ 、 $E_{e,j}$ 分别是用单高斯光点和方光点光刻的位相结构的理论和实验衍射效率. 我们模拟了用高斯光点光刻后形成的整形元件的位相结构, 高斯光刻光点凹形底部与边缘的位相差为 π , 由此形成的二元整形位相元件的理论衍射效率 $E_{i,g}$ 为 18% 左右. 同样的整形元件用平顶型方形点光刻, 由于点内的光强均匀, 从表 1 看到, 用方点光刻 $0, \pi$ 两个台阶的整形位相元件, 通过迭代算法获得的理论衍射效率 $E_{i,j}$ 可达 35.2%.

2 光束整形元件的制作与讨论

在目前比较先进的激光直写系统(如 Heidelberg DWL66 等)中, 采用显微物镜对激光束直接聚焦, 波长 441.6 nm, 对 $NA = 0.65$ 显微物镜, 最小高斯光斑约 $1.0 \mu\text{m}$ 左右. 对位相最小单元结构为 $10 \mu\text{m}$, 需 10 次逐行扫描形成 $10 \mu\text{m}$ 的线宽, 每次扫描线的相

交界处有 $40 \sim 100 \text{ nm}$ 的隔栅, 影响了光刻浮雕的质量. 显然, 受聚焦点线度影响, 无论是制作掩膜还是直接光刻浮雕结构, 高斯光斑逐行扫描直写会形成圆角和边缘邻近效应, 另外, 逐行扫描二元位相结构所要生成数据量很大. 用 $NA = 0.25$ 显微物镜, 实验上可得到 $8.0 \mu\text{m}$ 聚焦点, 但用这样大的圆形高斯光束来逐行扫描二元位相结构是不合适的.

为了克服上述问题, 我们提出并研制了如图 2 所示的激光直写光刻系统, 主要改进是增加了光阑和双远心投影成像光路, 数据结构上采用逐点控制的点阵光刻数据. He-Cd (441.6 nm, 20 mW, Kimmon) 激光束经过声光调制 AOM、扩束镜 SF、准直透镜 C, 照明方形光阑 A, 由专门设计的 L_0 、 L_1 组成的双远心投影成像系统将 A 缩微成方形光点, 前组 L_0 采用 $f = 160 \text{ mm}$ 的透镜, 后组 L_1 采用 $NA = 0.65$ 的无穷远工作距显微物镜, 设光阑通光尺寸为 A_0 , 光束经过光阑后在显微物镜前焦面上的中央光斑尺寸为 $D = 1.22 \lambda f / A_0$, 当 $A_0 = 0.25 \text{ mm}$ 时, $D = 0.35 \text{ mm}$, 属于严格的近轴成像, 像方实际分辨率可达到 $1 \mu\text{m}$, 当 $A_0 = 0.32 \text{ mm}$ 时, 方光点尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 采用 $NA = 0.80$ 的无穷远工作距显微物镜, 方形光刻点为 $5 \mu\text{m}$. 扩束光斑直径为 2 mm , 光阑仅是光束中的中间小部分, 可以认为光阑内的光强是均匀的. 相比直接聚焦高斯细光束的调焦精度 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 水平的调焦要求, 双远心投影光路使得光刻点的调焦范围达 $50 \mu\text{m}$ 左右, 降低了光刻胶基片和机械系统的平行性要求, 而且, 像方实际分辨率可达到 $1 \mu\text{m}$, 从实用性和可靠性角度看, 上述设计是合理的. 采用双远心投影成像光路的不足之处是能量利用率低, 但由于激光聚焦点极细, 单点曝光时间仍然在微秒水平, 并不影响系统的运行效率. 目前的激光直写系统在 $10 \mu\text{m}$ 光点下的光刻速率做到 60 点/s, $2.56 \text{ mm} \times 2.56 \text{ mm}$ 面积所用时间 $\sim 0.3 \text{ h}$, 逐点光刻二元位相结构所需的数据结构简单, 数据量很小, 容易处理和控制. 要实现同样位相结构, 用单高斯光点是非常困难的. 将图 1(a) 所示的图像, 经过迭代运算后编码成 256×256 阵列两台阶位相数据, 生成的文件为 *.tiff 或者 *.bmp, 并且转换成自定义的点阵数据结构 *.arr, 输入计算机控制激光直写系统在光刻胶上逐点光刻. 用 $10 \mu\text{m}$ 光点光刻两台阶结构浮雕位相结果的实际衍射效率参见表 1 中的 $E_{e,j}$ 和 $E_{e,g}$. 用单高斯光点光刻, 整形元件得到的 +1 级实际衍射效率 $E_{e,g}$ 仅为 15% 左右, 图 3(a) 为底部直径为 $10 \mu\text{m}$ 的高斯光点分布图, 可以看到高斯光点的质量与形状与方型位相单元结构相差很大, 导致了衍射效率的下降和衍射噪声的增

加,从用 650 nm 激光束照射后的再现图样图 3(b),可以看出,衍射图样中间存在着较强的零级光,再现区域内衍射噪声较大.

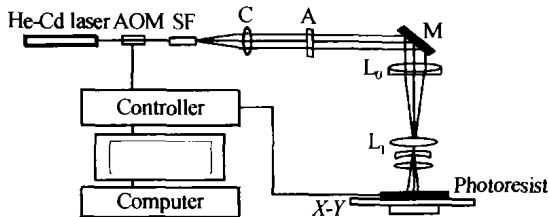


图 2 具有方形光刻点设计的激光直写系统

Fig.2 Laser direct writing system with square-dot

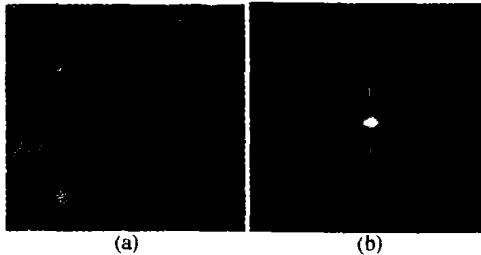


图 3 (a) 高斯点光刻的位相结构 (SEM); (b) 位相结构的再现像

Fig.3 (a) Phase structures etched by square spot and (b) Its reconstructed image

图 4(a) 为用 10 μm 方光点光刻的位相结构的电镜照片,实验中,用 10 μm 方点逐点光刻(成像分辨率为 1 μm),相差 π 的两个台阶位相结构的 +1 级衍射效率 E_{+1} 可达到 31%,用 650 nm 激光束照射,在远场输出如图 4(b) 所示的整形图像,可以看到,整形图像具有很好的再现质量和高信噪比,衍射光强分布均匀.

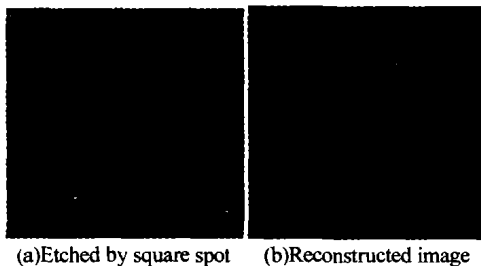


图 4 二元整形元件的再现像

Fig.4 Phase structures

二元整形元件的衍射角度取决于最小位相结构的尺寸,目前研制的激光直写系统能够获得 5 μm 的方形光点,系统的光刻速率最大做到了 120 点/s,光刻 2.56 mm \times 2.56 mm 面积的二元整形元件所用时间约为 0.6 h. 需要指出的是,将上述系统的逐点光刻运行模式改变到逐行扫描运行模式,用方型光点也同样可进行其他各种矢量化图像的光刻直写.

实验中发现,浮雕深度误差只改变零级光强度,不影响衍射光的光场分布,从图 4(b) 可看出,由于浮雕深度没有做到严格的理论值,仍有很小零级光存在,衍射效率实验值与理论值存在误差的主要因素有,曝光与显影后台阶的深度控制、机械定位精度

以及光学系统的投影分辨率. 目前研制的激光直写系统的机械定位精度为 1 μm ,有望通过改进定位精度来降低整形图像的噪声. 从图 5 的 Zygo 表面轮廓仪获得的二维浮雕结构图像看,采用远心投影成像光路后,台阶的平坦度和边缘陡度明显改善.



图 5 用方点光刻的位相浮雕槽型

Fig.5 Photo of phase grooves etched by square spot

3 结论与展望

综上所述,我们提出的方光点激光直写系统来光刻二元整形元件方法,对光点调焦精度要求显著改善,浮雕深度容易控制,可快速获得具有较高衍射效率的光束整形元件. 从而,该方法是一种快速、可靠、成本相对较低的二元整形元件的制造手段. 另外,对优化算法的改进,有望对提高位相结构的衍射效率和降低元件再现噪声有帮助,进一步的工作是希望提高系统的定位和曝光量控制精度并获得 2 ~ 3 μm 的方光点,实现多台阶整形元件位相分布的光刻.

参考文献

- Jain K. Lithography and photo-ablation systems in Microelectronics and optoelectronics; importance of laser beam shaping in system designs. *Proc of SPIE*, 2002, **4770**: 1 ~ 12
- Herzig H P. Ed., *Micro: Optics elements, systems and applications*. Taylor & Francis Ltd., 1997
- Drinkwater J, Ryzi, Zbynek O C. 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. *Proc of SPIE*, 2002, **4677**: 203 ~ 214
- Zhang Jin, Feng Boru, Kuo Yongkang. Theoretical analysis of fabricating nanometer hole array by four laser beams interference lithography. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32** (4): 398 ~ 401
- Feng Di, Yan Yingbai, Tan Qiaofen, et al. Design multi-function diffractive phase plates for beam shaping. *Acta Photonics Sinica*, 2003, **32**(8): 997 ~ 1000
- Cui Song, Gao Yingjun, Ruan Chi, et al. A microlens projection photolithographic system. *Acta Photonics Sinica*, 2002, **31**(6): 769 ~ 773
- Chen Linsen, Xie Jianfeng, Shen Yan, et al. Fabrication of 3D Image Laser Printing System with SLM. *Laser &*

- Infrared, 2003, **33**(5): 267 ~ 270
- 8 Johansson M, Bengtsson J. Robust design method for highly efficient beam-shaping diffractive optical elements using an iterative-Fourier-transform algorithm with soft operations. *J of Modern Optics*, 2000, **47**(8): 1385 ~ 1397
- 9 Zhai Honchen, Liu Fumin, Yang Xiaoping, *et al.* Improving binary images reconstructed from kinoforms by amplitude adjustment. *Opt Comm*, 2003, **219**: 81 ~ 85
- 10 Birch P, Young R, Farsari M, *et al.* A comparison of the iterative Fourier transform method and evolutionary algorithms for the design of diffractive optical elements. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, **33**: 439 ~ 448
- 11 Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 1972, **35**: 237 ~ 246
- 12 Wyrowski F, Bryngdahl O. Iterative Fourier transform algorithm applied to computer holography. *J Opt Soc Am A*, 1988, **5**(7): 1058 ~ 1065

A New Laser Direct Writing Method of Binary Beam-shaping Element

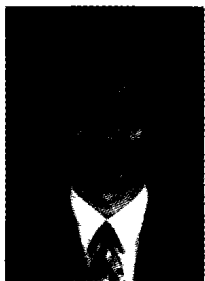
Chen Linsen, Shao Jie, Wang Xuehui, Xu Bing, Xie Jianfeng, Shen Yan

Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou 215006

Received date: 2004-01-13

Abstract In order to realize the fabrication of binary beam shaping element with complex phase structures, a new method of making the relief phase structures under the dot-by-dot exposure mode is presented by using laser direct writing (LDW) system with the square-spot. The size of the square spot obtained with the projection optical configuration is set to match with the minimum phase unit which lead to exposure mode can be easily controlled. The diffraction properties of the phase unit structures etched with single Gaussian spot and square spot are discussed. The binary beam-shaping elements with two-steps by square-spot exposure have been achieved to 31% +1 order diffraction efficiency. The experimental results are given.

Keywords Binary optics, diffraction, phase encoding, laser direct writing



Li lin was born in January of 1961. He was received BS degree in 1982 and Master degree in 1986 from Soochow University. Now he is a professor in the Institute of Information Optical Engineering of Soochow University. His research activities are involved in the fields of optical information processing, digital photolithographic system, binary optics and holography. He won the National Science and Technology Award in 2002 for his successful work in digital laser photolithographic system.