

文章编号 1004-924X(2006)05-0792-05

# 激光直写凹球面网栅的电控实现

梁凤超<sup>1,2</sup>, 胡君<sup>1</sup>, 续志军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**凹球面网栅激光直写系统采用同心结构,应用调节角速度的控制算法以及周期纬线纬纬相交形成网栅的图形结构,确保激光直写光斑在不同的纬度以不同角速度扫描,始终保持线速度和曝光量恒定,实现了在凹球面上以恒定曝光量激光直写网栅。分析了网格周期、角速度和纬线弧长等关键参数,设计了控制程序。在通光孔径60 mm的普通玻璃凹球面上进行了多组激光直写试验,设定周期450~800  $\mu\text{m}$ ,线速度1~20 mm/s,经显影、定影后由微米级读数显微镜测得网格实际周期与设定周期误差在 $\pm 3\%$ 以内,原子力显微镜测得线宽小于5  $\mu\text{m}$ 。结果表明:采用同心结构及稳光、调速控制保证凹球面网栅激光直写系统的曝光量不变,线条侧壁陡直、平行,具有较好的均匀性,满足了设计要求。

**关键词:**凹球面;激光直写;网栅;PMAC

**中图分类号:**TN305.7 **文献标识码:**A

## Realization of electric control of laser direct writing mesh on concave spherical substrate

LIANG Feng-chao<sup>1,2</sup>, HU Jun<sup>1</sup>, XU Zhi-jun<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** By using a concentric configuration, a control arithmetic of adjusting the angular velocity and a mesh pattern of periodical latitude lines intersecting periodical latitude lines perpendicularly to ensure the writing spot scanning at different angular velocities in different latitudes and to keep the linear velocity and exposure dose invariable all the time in the laser direct writing system the invariable exposure dose laser direct writing mesh on the spherical substrate was realized. The key parameters such as the periods of gridding, the angular velocity and the arc length of the latitude lines were analyzed and the control program was designed. Several group experiments of laser direct writing mesh on the concave spherical substrate made of common glass with  $\phi 60$  mm were done at periods of 450~800  $\mu\text{m}$  and linear velocity of 1~20 mm/s. After development and fixation, the error of gridding periods measured by micron level reading-microscope is within  $\pm 3\%$ . Line width measured by AFM is less than 5  $\mu\text{m}$ . The experiments results indicate that the concentric configuration and control of steady light and angular velocity adjusting have ensured the exposure dose invariable, which make laser direct

收稿日期:2006-01-14;修订日期:2006-07-11.

基金项目:国防科技预研基金项目(No 10.4.2.ZK1001)

writing lines on the spherical substrate have good uniformity, steep and straight side walls parallel to each other for satisfying the design requirements.

**Key words:** concave spherical substrate; laser direct writing; mesh; PMAC

## 1 引言

激光直写技术综合运用光学、机械学、电子学和计算机科学等学科技术,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。它对光学系统、电控系统和机械系统精度都有较高的要求。其原理是:在激光直写设备上,电控系统控制曝光装置对涂有感光胶层的工件精确定位曝光得到线条潜影,再经显影、定影、坚膜、镀膜和腐蚀等工序将图形转移到工件上<sup>[1-2]</sup>。

曲面基底上衍射光学元件的制作技术主要有金刚石车削、软刻蚀和激光直写等。应用激光直写技术在曲面基底上制作光学元件较金刚石车削、软刻蚀具有优越性。金刚石车削技术只能在诸如金属铝、铜等软的金属上制作,其基底材料有限。软刻蚀一般是通过表面复制有微细结构的弹性印章来转移图形,但是这种技术对转移图形和基底之间的对准精度却无法保证。激光直写既可以在曲面上加工衍射光学元件,又可以保证写入图形和曲面基底的对准精度<sup>[3]</sup>。凹球面是曲面的特例,在其上制备线宽小且均匀、具有一定周期的金属网栅薄膜,通过改变线宽、周期、镀膜材料等能够实现特定的滤波功能,在电磁屏蔽方面有重要的应用价值。影响其电磁屏蔽效能的关键在于线宽的均匀性和周期的准确性。为提高凹球面激光直写网栅线宽的均匀性和周期的准确性,文中着重分析了电控关键技术并给出了实现方法。

## 2 关键控制技术

### 2.1 恒定曝光量

激光直写曲面或平面时,线条轮廓是由胶层内曝光量的空间分布决定的,保持曝光量的恒定是提高线条质量的首要途径。激光直写凹球面通常有三维坐标结构和同心结构(球面坐标)两种方式。三维坐标结构中,光斑在凹球面不同位置呈大小不一的椭圆形,造成线宽不一致。同心结构即同心机械结构和同心扫描光学系统<sup>[4]</sup>,保证光

斑始终在凹球面聚焦为圆形,克服了三维坐标方式中光斑变形的缺陷。但如果同心结构中不采用合适的控制算法,在不同的纬度光斑将具有不同的线速度,造成曝光量不恒定而降低线条质量。可见控制曝光量恒定是凹球面激光直写的关键技术之一。

凹球面激光直写系统采用上述同心结构,保证了激光束径向聚焦于凹球面。曝光量等于曝光光强与曝光时间的乘积,扫描焦斑强度一定时扫描速度决定了胶层内的曝光量,曝光光强由写入焦斑强度分布决定,曝光时间由扫描速度决定。因此,激光直写的曝光量是由扫描速度和写入焦斑光强共同决定的<sup>[5]</sup>。保持曝光量的恒定可通过调节光强或调节扫描速度来实现。

(1)保持光强不变,调节扫描角速度。激光经过稳光器保持光强恒定,电控系统执行精确的调速算法,随光斑纬度的变化精确调整角速度使扫描线速度恒定,从而实现了恒定曝光量。

(2)扫描角速度恒定,调节光强。长春光机所的二元光学曲/平面激光直写设备采取了声光调制的方法,激光束的强度由一个可以达到256个强度等级的声光调制器控制<sup>[3]</sup>,实现了曝光量的恒定。

凹球面网栅激光直写系统最终针对大口径凹球面,每个方向的周期纬线超过千条,俯仰角度变换频繁,声光调制器的强度等级及调节速度难以满足要求,采用方法(1)可克服这种缺点,其难点在于精确的控制算法。

### 2.2 网栅形成

网栅要求网格周期数百微米,具有周期性。精确、简易地制备此种网栅的方法是关键技术之一。提出周期纬线纬纬相交形成了网栅图形结构:设凹球面水平两个方向的边缘为A边缘和B边缘,光斑定位于凹球面底端点,光斑仰动设定周期并定位于凹球面A边缘,凹球面水平扫描使光斑定位于凹球面B边缘扫描曝光形成纬线;光斑再仰动设定周期并定位于凹球面B边缘,凹球面反方向水平扫描使光斑定位于凹球面A边缘形成下一条纬线。采用此方法在凹球面上激光直写

一个方向上的周期纬线,然后将凹球面旋转  $90^\circ$ ,按同样方法激光直写另一个方向上的周期纬线,两个方向上的周期纬线相交便形成了所需网栅。

### 3 电控实现

#### 3.1 电控系统组成

如图 1 所示,凹球面激光直写系统电控系统由工业计算机、PMAC 可编程多轴运动控制器、ACC-8S 两轴信号输出板、方位电机、俯仰电机、 $90^\circ$ 位置切换电机、稳光器、激光快门等组成。其中,PMAC 是整个伺服控制系统的核心部件,它发出频率可变脉冲串经 ACC-8S 激励电机驱动器驱动电机精密协调运转。电机的位置、速度信息实时反馈给主机实现闭环控制。对伺服控制系统进行 PID 调节,使之成为无稳态误差和超低速度误差的优良运动系统。在计算机把直写网栅运动程序下载到 PMAC 后,主机进行监控与计算工作;实时传送控制参数,实时监测运动状态。

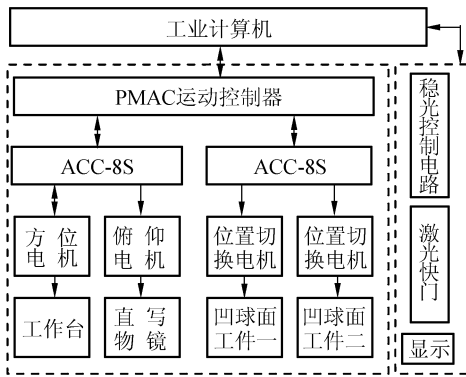


图 1 伺服控制系统原理

Fig. 1 Principal of servocontrol system

#### 3.2 关键控制参数分析

图 2 为凹球面激光直写纬线状态示意图。凹球面半径为  $R$ , 通光孔径为  $D$ , 网格周期为  $g$ , 线速度为  $V$ 。  $O$  为凹球面球心,  $O_i'$  为截面圆圆心, 结合图 2 可推导出如下关键控制参数:

$$N = \left[ \frac{2R \times \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) - 1}{g} \right], \quad (1)$$

$$\theta = \frac{g}{R}. \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{V}{R \times \cos\left[\arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) - \frac{ig}{R}\right]}, \quad (3)$$

$$S_i = 2R \cos\left[\arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) - \frac{ig}{R}\right] \times \arcsin\left\{ \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - R^2 \sin^2\left[\arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) - \frac{ig}{R}\right]}}{R \cos\left[\arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) - \frac{ig}{R}\right]} \right\}, \quad (4)$$

PMAC 以 PFM(脉冲频率调制)模式发出指令,

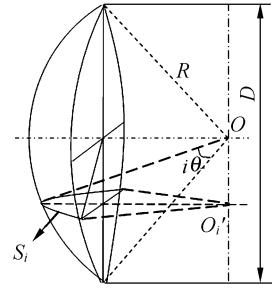


图 2 凹球面激光直写第  $i$  条纬线状态示意图

Fig. 2 State of laser direct writing No.  $i$  latitude line on concave spherical substrate

参数  $\theta$ 、 $\omega_i$  和  $S_i$  必须转化成 PMAC 能识别的脉冲指令形式。设激光直写系统方位轴传动比为  $I_v$ , PMAC 发出  $\chi$  个脉冲使方位电机转一圈, 则有

$$\omega_{i,p} = \frac{I_v \omega_i \chi}{2\pi}, \quad (5)$$

$\omega_{i,p}$  为  $\omega_i$  的脉冲指令形式。

$$S_{i,p} = \frac{S_i I_v \chi}{2\pi R \cos\left[\arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) - \frac{ig}{R}\right]}. \quad (6)$$

$S_{i,p}$  为  $S_i$  的脉冲指令形式。

设激光直写系统俯仰轴传动比为  $I_h$ , 俯仰电机接收  $y$  个脉冲转一圈, 同理可求得网格周期寻道角的脉冲当量  $\theta_p$  为:

$$\theta_p = \frac{g}{2\pi R} I_h y, \quad (7)$$

以上公式中经取整运算的  $N$  为每个方向上的纬线总数,  $i$  为从 1 到  $N$  取值的纬线序号,  $\omega_i$  为角速度,  $\theta$  为网格周期当量圆心角,  $S_i$  为第  $i$  条纬线的弧长。长度单位为 mm, 角度单位为 rad。频率单位为 pps, 线速度单位为 mm/s, 角速度单位为 rad/s。已知凹球面工件的半径  $R$ , 通光孔径  $D$ , 设定的周期  $g$  以及激光直写线速度  $V$ , 由公式 (5), (6), (7) 就可求得激光直写第  $i$  条纬线的关键控制参数  $\omega_{i,p}$ 、 $S_{i,p}$  和  $\theta_p$ 。

### 3.3 控制方法及算法实现

凹球面工件由专用卡具安装在激光直写设备上,激光束经过稳光器、快门、扩束器、偏振分光镜组、透镜组和物镜聚焦于感光胶面上。制备网栅的控制顺序和方法如下:计算机控制关激光快门,PMAC 运动程序控制光斑精确定位于纬线起点,开激光快门,方位电机以角速度  $\omega_{Lp}$  扫描,扫描至纬线终点立即关激光快门,完成本条纬线的激光直写。依此原理继续激光直写其它纬线<sup>[6]</sup>。一个方向周期纬线激光直写结束后,关激光快门,凹球面旋转  $90^\circ$ ,光斑快速返回起始点激光直写此方向上的周期纬线,形成网栅。

计算机主控制程序用 VC++ 语言编制,其功能包括:加工参数录入及计算、运动程序生成、运动状态实时监测和实时控制快门开关等。计算机根据凹球面工件和网栅参数,按公式(1)、(5)、(6)和(7)计算出每个方向上总纬线数  $N$ 、角速度  $\omega_{Lp}$ 、弧长  $S_{Lp}$  和周期寻道脉冲数  $\theta_p$ ,而后将参数实时嵌入 PMAC 运动程序,控制光斑以周期  $\theta_p$  寻道、以恒定线速度  $V$  扫描,行程为弧长  $S_{Lp}$ 。在

PMAC 执行运动程序时计算机实时监控运动状态、实时控制激光快门,实时传送下一条纬线的控制参数。图 3 为凹球面激光直写控制程序流程。

## 4 实验

凹球面网栅激光直写系统在通光孔径 60 mm 的普通玻璃凹球面基底上制备网栅。工艺流程为:工件清洗,吹干,旋涂正定型感光胶,激光直写,显影,定影,镀膜,腐蚀和电镀<sup>[7-8]</sup>。表 1 给出了网栅制备实验条件及设定周期参数,由读数显微镜测量的实际网格周期以及原子力显微镜测得的线宽。计算得网格周期误差最大为  $-2.44\%$ ,最小为  $0.18\%$ <sup>[9-10]</sup>。图 4、5 为原子力显微镜测得显影定影后的线条,线宽小于  $5\ \mu\text{m}$ ,线条侧壁平行、陡直,具有较好的均匀性。图 6 为高倍放大后的凹球面网栅局部照片,可见网格大小一致,呈周期分布。

表 1 凹球面网栅的周期误差

Tab.1 Period error of mesh on the concave spherical substrate

设定周期( $\mu\text{m}$ )	800	800	450	800	550	500
通光孔径(mm)	60	60	60	60	60	60
线速度(mm/s)	4	1	20	10	15	10
实测周期( $\mu\text{m}$ )	812	809	439	815	549	508
周期误差(%)	1.5	1.13	-2.44	1.88	0.18	1.6
胶膜厚度(nm)	248	235	295	284	275	240
线宽( $\mu\text{m}$ )	3.9	3.7	3.7	2.9	2.9	4.5

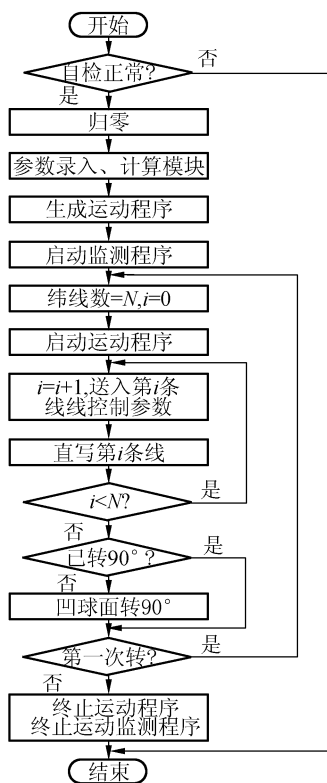


图 3 激光直写凹球面网栅控制程序流程

Fig. 3 Program flow char of laser direct writing mesh on concave spherical substrate

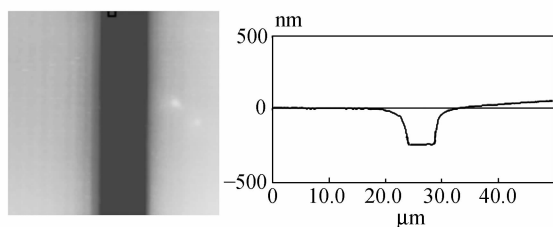


图 4 显影后测试线宽  $4.5\ \mu\text{m}$ ,膜厚 240 nm

Fig. 4 Line width of  $4.5\ \mu\text{m}$  and photoresist thickness of 240 nm after development and fixation

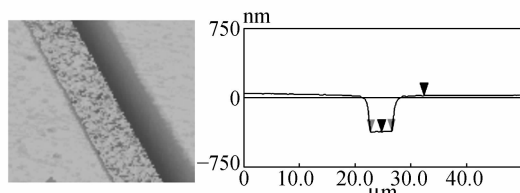


图 5 显影后测试线宽  $3.7\ \mu\text{m}$ ,膜厚 295 nm

Fig. 5 Line width of  $3.7\ \mu\text{m}$  and photoresist thickness of 295 nm after development and fixation

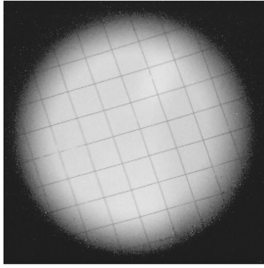


图 6 凹球面网栅局部

Fig. 6 Part of mesh on concave spherical substrate

## 5 结 论

实验结果表明,凹球面网栅激光直写系统采用机械和光学同心结构以及稳光控制保证了光强不变,电控系统应用周期纬线经纬相交的网栅图形结构和调节角速度的精确控制算法,实现了凹球面激光直写曝光量的恒定,在凹球面基底上制备出周期  $100\sim 800\ \mu\text{m}$ ,误差小于  $\pm 3\%$ ,线宽小于  $5\ \mu\text{m}$  且具有较好均匀性的网栅。

## 参考文献:

- [1] 马宏. 精密刻划工艺[M]. 北京:兵器工业出版社.  
MA H. *Technics of precision scoring*[M]. Beijing: Weapon Industry Press. (in Chinese)
- [2] XIE Y, LU Z, LI F. Fabrication of large diffractive optical elements in thick film on a concave lens surface[J]. *Optics Express*, 2003, 11:992-995.
- [3] 谢永军. 曲面激光直接写入技术[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.  
XIE Y J. *Laser direct writing technology on curved surface*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [4] 胡君, 梁凤超, 熊木地, 等. 影响球面激光直写线宽均匀度的关键技术[J]. 光电工程, 2006, 33(3):1-4.  
HU J, LIANG F C, XIONG M D, et al. Key techniques influencing the linewidth evenness grade with laser direct writing on the spherical surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(3):1-4. (in Chinese)
- [5] 李凤有. 激光直写光刻技术研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.  
LI F Y. *Study on technology of laser direct writing photolithography*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [6] 梁凤超, 胡君. 凹球面激光直写系统电控误差分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4):223-227.  
LIANG F C, HU J. Electrical control error analysis of concave spherical surface laser direct writing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 223-227. (in Chinese)
- [7] 冯晓国, 方梁, 孙连春. 金属网栅结构参数设计与制作[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1):59-64.  
FENG X G, FANG L, SUN L C. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 59-64. (in Chinese)
- [8] 李凤友, 卢振武, 谢永军, 等. 激光直写方法制作透明导电金属网栅[J]. 光子学报, 2002, 31(10):1270-1272.  
LI F Y, LU ZH W, XIE Y J, et al. Transparent conductive metallic film mesh fabricated by laser direct writing technique[J]. *ACTA Photonica Sinica*, 2002, 31(10):1270-1272. (in Chinese)
- [9] 易大义. 计算方法[M]. 杭州:浙江大学出版社.  
YI D Y. *Numerical method*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press. (in Chinese)
- [10] 费业泰. 误差理论与精度分析[M]. 北京:机械工业出版社.  
FEI Y T. *Error theory and precision analysis*[M]. Beijing: Mechanic Industry Press. (in Chinese)

作者简介:梁凤超(1978—),男,吉林松原人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,机械电子工程专业,主要研究方向为精密伺服控制技术和光电传感与测控技术。E-mail: liangxfile@yahoo.com.cn;