

# 衍射光学二维激光扫描器设计制作研究

周崇喜 杜春雷 郭永康\* 邱传凯 周礼书 林大键

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

**摘 要** 提出、设计并采用激光直写和反应离子刻蚀技术制作出一种新型的衍射光学纯相位型二维激光扫描器, 并进行了系统参数的实验测试, 其扫描角度为  $25^\circ \times 25^\circ$ , 衍射效率为 41%。

**关键词** 衍射光学, 二元光学, 激光扫描。

## 1 引 言

激光扫描目前主要有: 机械转镜扫描、检流计扫描、谐振镜扫描和全息扫描<sup>[1, 2]</sup>。比较成熟的是光机扫描, 但由于扫描角度比较小, 受转动惯量的影响, 难于实现高速扫描, 更难实现二维扫描。全息扫描是随着全息技术的发展而逐步发展起来的一种低惯量扫描<sup>[3]</sup>。传统的全息图是用干涉技术产生的, 采用球面波与球面波干涉或球面波与非球面波(如柱面波或平面波)干涉就可产生变栅距光栅。当入射光照到光栅不同栅距的地方, 使得衍射光的方向不同, 从而实现光束扫描。由于球面波是一种中心对称波面, 必然使干涉条纹呈弧状, 这样导致了扫描线的弯曲。计算机制作全息图问世后, 出现了计算全息扫描器, 由于它仍然是振幅型的, 最佳情况下衍射效率仅为  $1.0/\pi^2 = 10\%$ 。人们采用漂白等一系列方式, 将全息图作成立相型的, 可提高衍射效率, 但光全息记录材料易磨损, 不耐激光损伤, 且难于校正像差, 像质不佳。

本文提出激光扫描器设计并制作成二元衍射元件, 它既可获得高的衍射效率, 又耐激光损伤。而且扫描器是一种特殊的成像器件<sup>[4, 6]</sup>, 利用成像衍射光学元件的优化设计方法对其像质进行优化, 可提高光斑质量。文中将研究激光扫描器的优化设计、制作技术及性能测量, 最后对测量结果进行分析。

## 2 二元衍射二维激光扫描原理

如图 1(a) 所示, 用平面波照射二元衍射激光扫描器的一个小区域, 当扫描器在位置 1 时, 在其焦平面位置 1 处形成一汇聚光斑; 当扫描器在位置 2 时, 在其焦平面位置 2 处又形成一会聚光斑; 当扫描器沿着  $x$  轴方向移动时, 在光学系统的后焦面上形成一条水平扫描线。如果在每一扫描器单元上加一不同的截波, 扫描光斑就会聚成不同的水平扫描线, 激光

\* 四川大学物理系, 成都 610064

收稿日期: 1998-01-31; 收到修改稿日期: 1998-08-31

束经过扫描器的不同单元时, 就形成的水平扫描线。若把这些小单元制在一个圆盘上, 那么当圆盘转动一周时, 就形成一帧扫描线。如图 1(b) 所示。

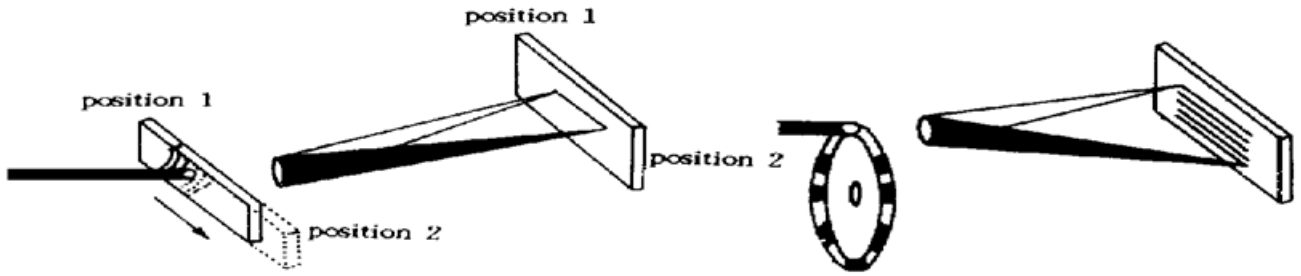


Fig. 1 Principle of 2-D laser scanning

众所周知, 纯位相型元件的位相函数  $\mathcal{Q}(x, y)$  与其衍射光的衍射方向  $(\theta_x, \theta_y)$  之间存在如下的关系

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{Q}(x, y)}{\partial x} \frac{\lambda}{2\pi} &= \sin \theta_x, & \frac{\partial \mathcal{Q}(x, y)}{\partial y} \frac{\lambda}{2\pi} &= \sin \theta_y, \\ \sin \theta_x / \lambda &= v_x, & \sin \theta_y / \lambda &= v_y \end{aligned} \quad (1)$$

$v_x$ 、 $v_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的空间频率。若  $x$  方向的扫描角度为  $\pm \theta_x$ ,  $y$  方向的扫描角度为  $\pm \theta_y$ ,

$$v_{x \max} = \sin \theta_x / \lambda, \quad v_{y \max} = \sin \theta_y / \lambda, \quad (2)$$

通常尽可能要求扫描光点移动的距离和扫描器移动的距离成线性关系, 且满足微分方程

$$\frac{\partial \mathcal{Q}(x, y)}{\partial x} \frac{1}{2\pi} = \frac{\sin \theta_x}{\lambda} = \frac{x}{w \Delta x} \quad (3)$$

式中  $w$  为扫描器的宽度,  $\Delta x$  为激光束由上一扫描点扫到下一点时, 扫描器沿着扫描线方向需要移动的距离。在  $y$  方向同样进行扫描, 其扫描频率为  $v_y$ , 为此求解方程(3)得

$$\mathcal{Q}(x, y) = \frac{\pi x^2}{w \Delta x} + c(y) \quad (4)$$

把(4)式对于  $y$  求偏导

$$\frac{\partial \mathcal{Q}(x, y)}{\partial y} \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} c'(y) = v_y \quad (5)$$

那么

$$c(y) = 2\pi v_y y \quad (6)$$

这里,  $v_y$  是一等差数列。所以衍射光学元件的位相方程为

$$\mathcal{Q}(x, y) = \frac{\pi x^2}{w \Delta x} + 2\pi v_y y \quad (7)$$

从(7)式可以看出, 扫描器的每一单元的位相函数为抛物线型方程。为了使光波通过扫描器后在  $y$  方向和  $x$  方向有着同样的焦距, 同时也为了制作掩模或激光直写时容易处理, 作者附加了一项  $y^2$ , 这里的(7)式应变为

$$\mathcal{Q}(x, y) = \frac{\pi(x^2 + y^2)}{w \Delta x} + 2\pi v_y y \quad (8)$$

### 3 像质的优化

由(8)式可以看出, 改变不同的  $v_y$  值就得到不同  $y$  方向的水平扫描线, 把所有的扫描器单元放置在一圆盘上, 当圆盘转动后, 就得到一条条不同的扫描线, 当圆盘转动一周后, 就得

到一帧扫描线。但是从(8)式只能得出二元衍射元件的一级特性参数,如扫描角度、焦距等,并不能控制光斑质量,即其二级特性参数。为此用成像型衍射光学元件的像差理论来进行扫描器像质的优化。

设衍射元件的位相方程为

$$\mathcal{Q}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^{i=m} d_{f_i} (x^2 + y^2)^i \quad (9)$$

式中  $d_{f_i}$  为衍射面系数。先讨论其一级特性。对于轴对称型,即中央扫描线对应的单元,由于入射光束的发散角较小,可以看成仅对轴上点成像,因此只需校正球差。

$$\mathcal{Q}(x, y) = \frac{\pi(x^2 + y^2)}{w \Delta x} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(x^2 + y^2)}{2(w \Delta x / \lambda)} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{(x^2 + y^2)}{2f'} = \frac{2\pi}{\lambda} d_{f_1} (x^2 + y^2) \quad (10)$$

从(10)式看出,系统的一级参数光焦度为

$$\Phi = 1/f' = 2d_{f_1} \quad (11)$$

当衍射元件孔径确定后,根据(11)式即可求出系统的高斯参数,如焦距  $f'$ ,像方孔径角  $u'$ ,为了校正球差,需校正衍射面四次项系数  $d_{f_2}$ ,因此位相函数应为

$$\mathcal{Q}(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \{d_{f_1}(x^2 + y^2) + d_{f_2}(x^2 + y^2)^2\} \quad (12)$$

衍射面产生的球差系数可写为

$$\Sigma S_1 = \frac{y^4 \Phi}{4} (1 + B^2 + 4BC + 3C^2) - 8d_{f_2} y^4 \quad (13)$$

众所周知,衍射型单透镜的弯曲参数  $B = 0$ ,共轭参数  $C = -1$ ,那么衍射透镜的球差系数为

$$\Sigma S_1 = y^4 \Phi - 8d_{f_2} y^4 \quad (14)$$

令  $\Sigma S_1 = 0$  解出  $d_{f_2}$  作为初始参数进行优化。

对于离轴对称型,即其余扫描线对应的那些小单元,为了校正离轴球差,需校正四次项系数  $d_{f_0} \sim d_{f_{14}}$ ,但是由于这些元件都是关于  $y$  轴对称的,因此应去掉  $x$  的奇次项,即表 1

Table 1. Coefficients of the diffractive surface

	$d_{f_1} = x^0 y^1$		$d_{f_3} = x^2 y^0$	
$d_{f_5} = x^0 y^2$		$d_{f_7} = x^2 y^1$		$d_{f_9} = x^0 y^3$
$d_{f_{10}} = x^4 y^0$		$d_{f_{12}} = x^2 y^2 df$		$d_{f_{14}} = x^0 y^4$

比较表 1 和(8)式,可得一级参数  $d_{f_1} = v_s \lambda$ , 和  $d_{f_3} = d_{f_5} = \lambda/2w \Delta x$ ,最后优化高次幂系数  $d_{f_7} \sim d_{f_{14}}$ 。

## 4 一例设计

本文设计的圆盘扫描器,其参数为:圆盘直径  $\Phi = 200$  mm,波长  $1.064 \mu\text{m}$ ,焦距  $23.18$  mm,分辨率  $1.0$  mrad,扫描范围( $25^\circ \times 25^\circ$ ),透镜尺寸  $1$  mm  $\times$   $10$  mm,光斑尺寸  $< 37 \mu\text{m}$ ,衍射效率  $81\%$ (四台阶)。图 2(a)为对应于扫描视场水平中央扫描线的扫描单元的位相轮廓俯视图;图 2(b)为对应于扫描视场最上端扫描线的扫描单元的部分位相轮廓俯视图。图 3(a)为对应于水平中央扫描线的扫描单元系统图,图 3(b)为中央位置时的点列图,图 3(c)为边缘位置时的点列图。图 4(a)为对应于最上端扫描线扫描单元的系统图;图 4(b)为中央位置时的点列图,图 4(c)为边缘位置时的点列图。

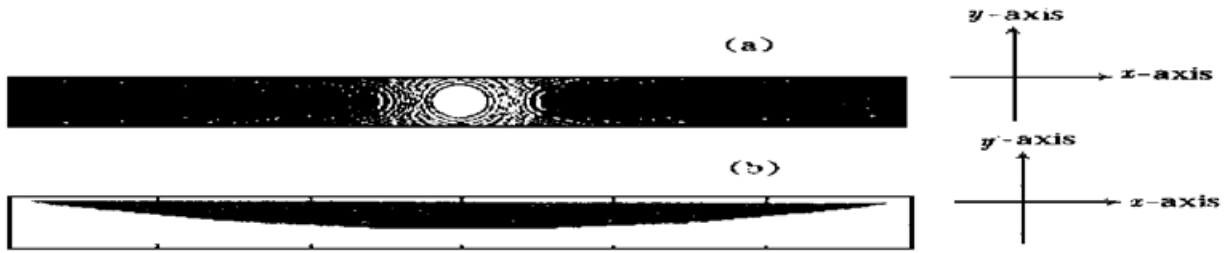


Fig. 2 Phase contour of the two laser scanning elements

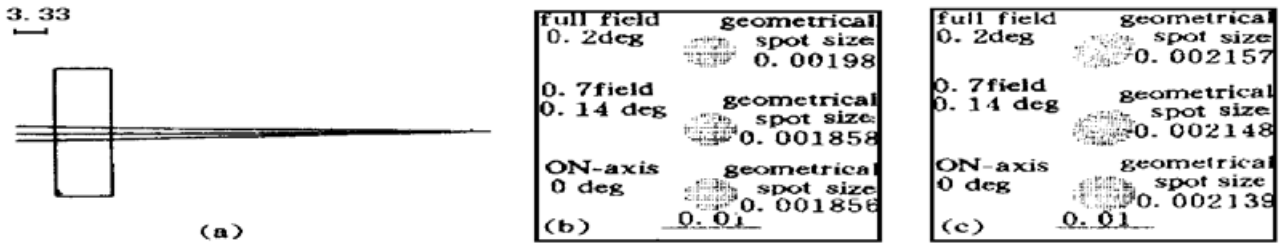


Fig. 3 Imaging of the middle scanning element

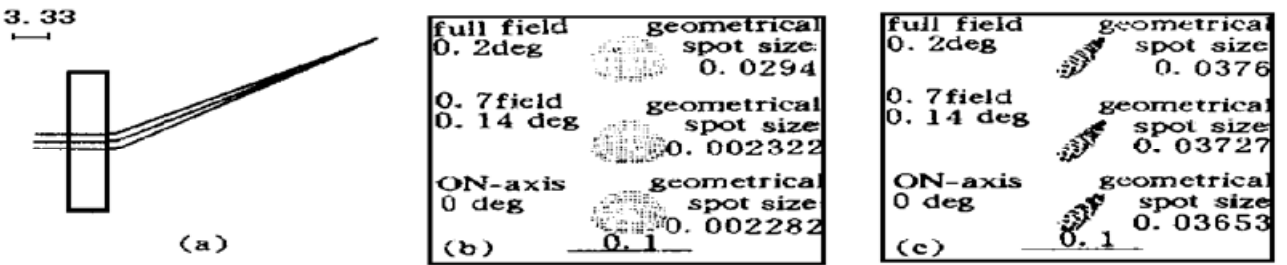


Fig. 4 Imaging of the top scanning element

从点列图的大小来看, 由于像差校正得比较好, 按光线追迹得到的光斑已接近衍射极限约 37 μm。

### 5 二维激光扫描器的制作及性能测试

设计波长 1. 064 μm, 石英对该波长的折射率 1. 4496, 因此第一次刻蚀深度为 589. 25 nm, 第二次刻蚀深度为 1178. 50 nm, 总深度为 1768 nm。图 5 为四台阶扫描器的表面位相轮廓俯视图, 图 5(a) 为对应中央扫描的扫描单元[即图 2(a)]放大 5 倍的部分俯视图, 图 5(b) 为对应最下端扫描线的扫描单元[即图 2(b)]边缘附近放大 100 倍的俯视图。

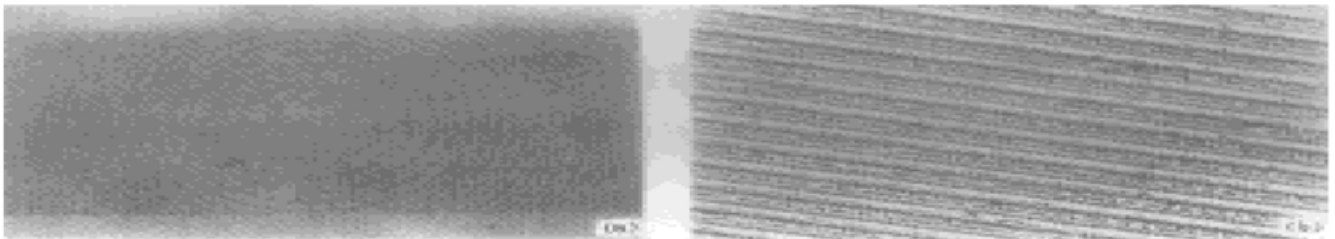


Fig. 5 Contour of relief profile of the 2-D laser scanner

#### 5.1 扫描角度的测量

本文设计的扫描器的工作波长为 Nd·YAG 激光器产生的 1. 064 μm 的脉冲红外光。为了便于测量, 实验使用波长为 0. 6328 μm 的 He-Ne 激光。图 6 为测量扫描角度的光路图。

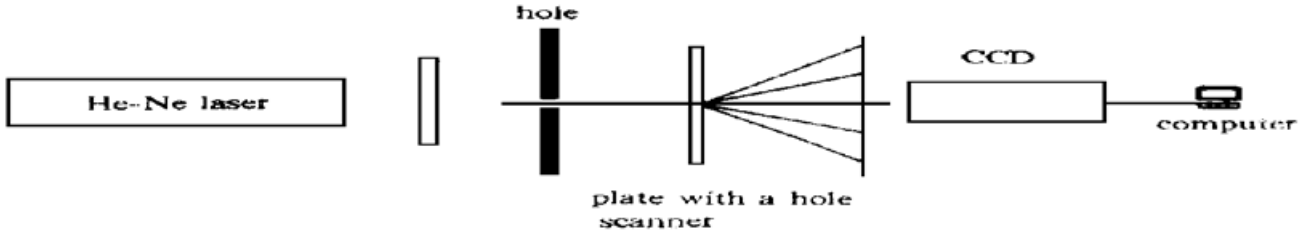


Fig. 6 Frame diagram of the testing scanning angles

从扫描器到带有小孔的接收屏距离为 40.0 mm，当扫描器的最左边移动到激光束中心时，让带有刻度的接收屏的坐标原点位于衍射一级光斑的中心。然后把扫描器的最右边移动到激光束中心，再移动接收屏，使其坐标原点再次位于衍射一级光斑的中心，用读数显微镜读出接收屏移动的距离，即得到扫描的距离。同理得到垂直方向上的扫描距离。然后根据下式计算出对应 1.064 μm 波长时扫描器的扫描角度

$$\sin \theta_{1.064} = \frac{\lambda_{1.064}}{\lambda_{0.6328}} \sin \theta_{0.6328} \tag{15}$$

$$\sin \theta_{0.6328} = \sin \left( \arctan \frac{\Delta}{d} \right) \tag{16}$$

最后计算结果见表 2

Table 2. Result of the calculation

horizontal scanning angle of zero frequency in vertical direction	26.71°(horizontal)
horizontal scanning angle of maximum frequency in vertical direction	25.99°(horizontal)
vertical scanning angle of maximum frequency in vertical direction	13.19°(vertical)

### 5.2 扫描轨迹线性测量

本文用 CCD 记录了不同扫描位置的光斑分布，如图 7、图 8 所示。图 7 对应中央扫描线，图 8 对应最上端扫描线，(a)、(b)、(c)、(d)、(e) 分别为五个不同位置时的光斑分布，(f) 为由五个位置合成的一级扫描线。扫描线性是很好的，最大线性误差不到一个像元尺寸(即 7 μm)。

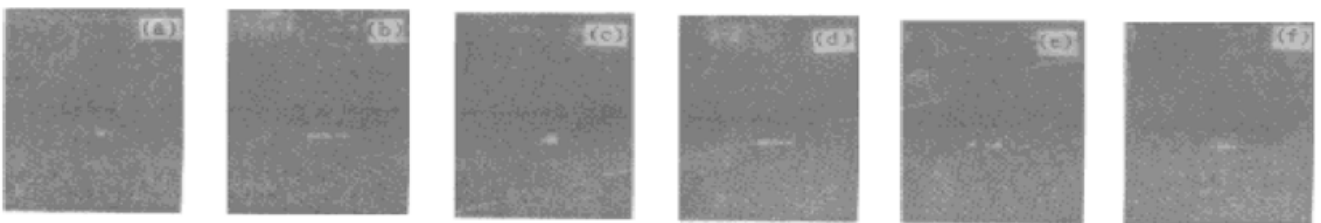


Fig. 7 Spots distribution of middle line at 5 locations and the synthetic scanning line

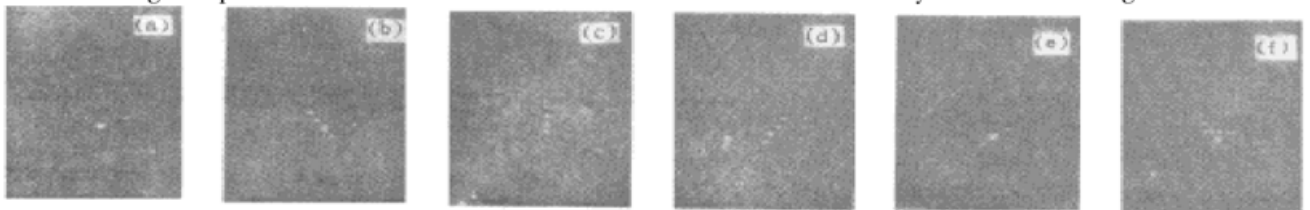


Fig. 8 Spots distribution of top line at 5 locations and the synthetic scanning line

### 5.3 扫描光斑的测量

用 CCD 记录的 He-Ne 激光通过扫描器产生的光斑如图 9(a) 和图 9(b) 所示；图 9(c) 为激光感光纸记录的 YAG·Nb 激光在扫描面所得到的结果，从图中可以看出，其一级衍射的光

斑是比较好的。同时也看出一级衍射效率也是比较高的。

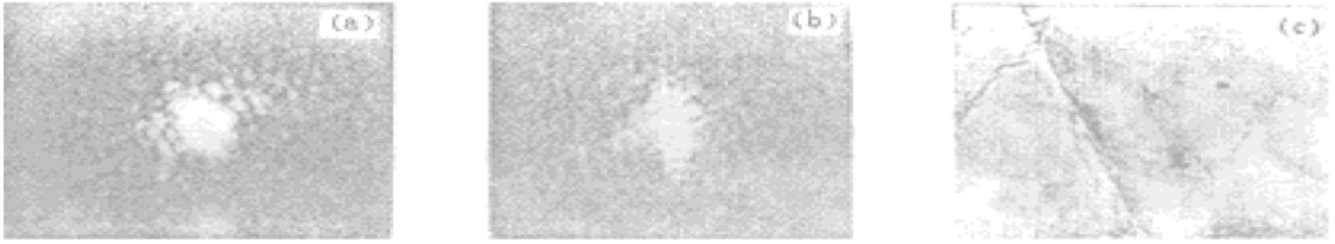


Fig. 9 Spot of the first order diffraction. (a) Co-axis 1st order spot, (b) Off-axis 1st order spot, (c) Scanning pattern from photoactive paper

CCD 像元尺寸为  $7 \mu\text{m}$ , 估算光斑 ( $1/e^2$  峰值强度) 尺寸占 10 个像元, 所以光斑大小为  $70 \mu\text{m}$ , 换算成 YAG·Nd 玻璃  $1.064 \mu\text{m}$  激光, 距离为  $23.18 \text{ mm}$ , 其尺寸仍约为  $70 \mu\text{m}$ 。

由于像差校正得比较好, 按光线追迹得到的光斑大小为  $37 \mu\text{m}$ , 接近衍射极限。光斑直径可根据标量衍射理论, 由下式求出

$$\Phi = (2.44\lambda/d)f' \quad (17)$$

式中,  $d = 1 \text{ mm}$ ,  $f' = 40 \text{ mm}$ ,  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , 计算得到光斑直径为  $61.76 \mu\text{m}$ , 和实测  $70 \mu\text{m}$  相比有一定的误差, 作者认为主要原因是由制作引起的。

#### 5.4 衍射效率的测量及误差分析

衍射效率是二元衍射光学元件的重要质量评价参数, 其定义为所考察级的衍射光能量与入射光能量的比值。根据目前可查阅的国内外文献报道, 衍射效率的测量方法差别较大, 因此所报道的结果很难相比较。

本文采用的是以所考察级的衍射光能量与入射光能量减去反射光能量的比值, 即衍射光与透射光能量之比, 表示为

$$\eta_{\text{doe}} = \frac{E_d}{(E_i - RE_i)} = \frac{E_d}{E_i(1 - R)} = \frac{E_d}{E_i}(1 + R) = \frac{E_d}{E_i} + \frac{E_d}{E_i} \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2} \quad (18)$$

式中  $E_d$  为第一级衍射光能量,  $E_i$  为入射光能量,  $R$  为元件表面的反射率,  $n$  为元件的折射率。利用脉冲激光测量二元衍射光学元件衍射效率的实验装置如图 10 所示。

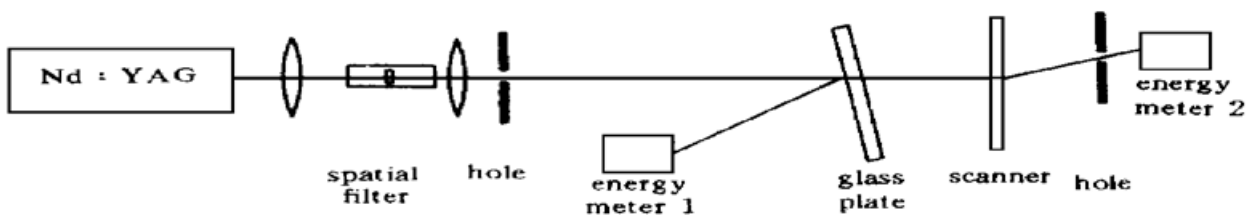


Fig. 10 Diagram of testing diffractive efficiency with pulse laser

由于脉冲激光器的输出能量极不稳定, 须采用两个激光能量计对输入和衍射能量进行同步测量, 为此需增加一玻璃平板进行取样。

设  $E_0$  为入射至玻璃平板的总能量, 玻璃平板的反射率为  $R'$ , 反射到能量计 1 上的能量  $E_1 = E_0R'$ , 那么入射到二元衍射光学元件上的能量为  $E_0(1 - R')$ , 经扫描器衍射到一级上的能量为能量计 2 所记录的  $E_2$ , 则衍射效率为

$$\eta = E_2/E_0(1 - R') \quad (19)$$

其中  $E_0 = E_1/R'$ , 那么衍射效率为

$$\eta = E_2R'/(1 - R')E_1 \quad (20)$$

通过给玻璃平板定标, 可确定  $R'$ , 将扫描器从光路中取出, 测出透射和反射能量  $E_{20}$  和  $E_{10}$ , [ $E_{20} = (1 - R')E_{10}$ ], 则  $\eta_0 = E_{20}R'/E_{10}(1 - R') = 1.0$ , 而  $E_{20} = (1 - R')E_{10}$ , 那么  $R'/(1 - R') = E_{10}/E_{20}$ , 把它代入(20)式得

$$\eta = (E_2/E_1)(E_{10}/E_{20}) \quad (21)$$

若再考虑扫描器表面的反射损失, 参照(18)式可得到衍射效率为

$$\eta_{\text{doe}} = \frac{E_2 E_{10}}{E_1 E_{20}} \left[ 1 + \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \right] \quad (22)$$

按公式(21)计算了同轴、离轴两个扫描单元的衍射效率分别为  $\eta_{\text{doe}} = 45.66\%$  和  $\eta_{\text{doe}} = 41.46\%$ 。

从以上设计及实验可以看出, 用二元衍射光学元件实现二维激光扫描不仅是完全可行的, 而且有很从优点。为了进一步提高其衍射效率以达到实用化的目的。一方面, 可以通过增大焦距减少扫描角度从而减小二元衍射光学元件的数值孔径, 进而增大其特征尺寸, 减小制作误差, 提高衍射效率。另一方面, 可以增大扫描器光源的使用波长, 如使用另外一个大气窗口的  $\text{CO}_2$  激光, 达到增加特征尺寸的目的。

### 参 考 文 献

- [1] 王 本, 沈树群. 激光扫描和光盘技术. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990
- [2] Stephen F. Sagan. Holographic laser imaging systems. *Proc. SPIE*, 1995, 2383, 398~ 407
- [3] 虞祖良, 金国藩. 计算机全息图, 北京: 清华大学出版社, 1984
- [4] H. P. Herzig, R. Dandliker. Design and fabrication of diffractive optical elements for beam shaping and imaging. *Proc. SPIE*, 1992, 1718 : 130~ 135
- [5] Dean Faklis, S Ong Peng, G. Michael Morris. Application of diffractive optics to laser scan lenses. *Proc. SPIE*, 1995, 2383 : 340~ 344

## Design and Fabrication of 2-Dimension Laser Scanner Using Diffractive Optical Elements

Zhou Chongxi    Du Chunlei    Guo Yongkang\*    Qiu Chuankai  
Zhou Lishu    Lin Dajian

(State Key Lab of Optical Technology for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,  
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 31 January 1998; revised 31 August 1998)

**Abstract** A new kind of diffractive 2-dimension laser scanner is proposed, designed and fabricated using laser direct writing (LDW) and reactive ion etched (RIE). The scanner is tested and the parameters of the  $25 \times 25$  degrees scanning range and 41% diffractive efficiency are obtained.

**Key words** diffractive optics, binary optics, laser scanning.

\* Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064