

# 微透镜列阵的离子束刻蚀及衍射效率测量

赵光兴 杨国光 陈洪璆 侯西云

(浙江大学光科系, 杭州 310027)

**提要** 采用 Kaufman 离子源刻蚀微透镜列阵并采用实时检测系统对刻蚀深度进行了控制。提出了测量微透镜列阵衍射效率的一种方法。对测量误差进行了讨论。

**关键词** 微透镜列阵, 离子束刻蚀, 衍射效率

## 1 引言

微透镜列阵在分束<sup>[1]</sup>、合束( $N \times N$ 个光束合成一束)及光束控制(如激光扫描<sup>[2]</sup>)等方面有着广阔的应用前景。用二元光学方法制作微透镜列阵,主要工艺可分为四步:(1)图形设计;(2)图形发生;(3)图形转移;(4)蚀刻。在这四步工艺中,蚀刻是重要的环节,直接影响到二元器件的成本与质量。由于离子束刻蚀分辨率极高,制作二元器件多采用离子束刻蚀法。本文采用 Kaufman 离子源刻蚀微透镜列阵并采用实时检测系统对刻蚀深度进行控制,提出了测量微透镜列阵衍射效率的一种方法,对测量误差进行了讨论。

## 2 图形的离子束刻蚀

离子束刻蚀二元光学图形的机理是:利用具有一定能量及准直的离子束轰击基片表面,将未被掩膜掩盖而裸露的部分进行刻蚀,从而得到预期的图形。首先要选择适当的工艺参数,这对提高刻蚀速率,缩短刻蚀时间,减弱真空环境对二元器件的影响具有重要意义。实验表明最佳工艺参数为工作气压  $6 \times 10^{-2}$  Pa,  $V_i = 70$  V,  $I_i = 4.5$  A,  $U_s = 90$  V,  $V_s = 1000$  V<sup>[3]</sup>。

刻蚀过程中,采用实时检测系统对离子束刻蚀深度进行控制。图1为我们设计的 ED 实时检测系统。将表面附有抗蚀剂图形的二元器件与和此二元器件基底材料完全相同的薄板(图1中的 F)一同置入刻蚀工作台,将激光束对后者进行测试(由于刻蚀条件、刻蚀材料相同,二者刻蚀深度相等)。系统中由于将透明薄板的上表面(刻蚀面)作为测量面,下表面作为参考面,测量光路与参考光路实现共路,从而避免了真空室中气体流动、振动及温度变化等影响,干涉条纹十分稳定。

为考察系统的精度,用蒸镀法在玻璃衬底上蒸镀一层  $0.4 \mu\text{m}$  厚铬膜,并形成一组线条图形(每毫米 10 条)。然后置入离子源中进行刻蚀。采用实时检测系统控制蚀深,刻蚀一段时间后取出衬底,除去掩膜,用膜层厚度台阶仪(BCT-1型)测出蚀深,结果如表1。

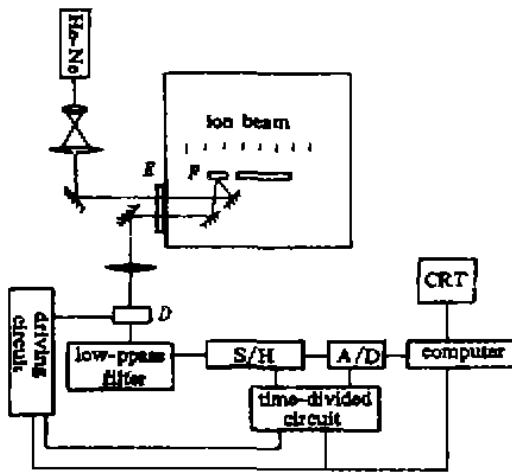


图 1 刻蚀深度实时测量系统

Fig. 1 Basic system for the real-time measurement of etching depth

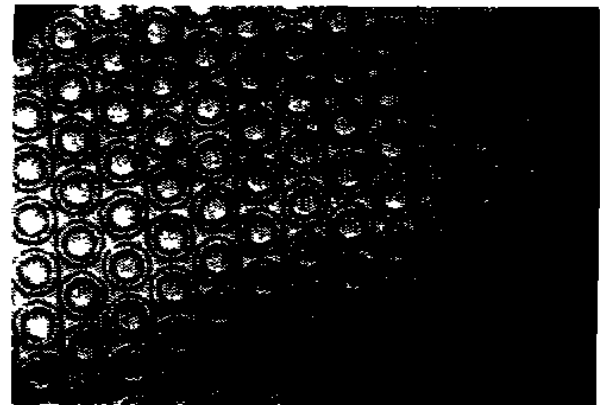


图 2 衍射微透镜的光学显微照片

Fig. 2 Optical micrograph of diffractive microlenses

表 1 刻蚀深度比较 (单位: nm)

Table 1 Etching depth comparison (units: nm) ( $E = 550 \text{ eV}$ ,  $J = 1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^2$ )

| Experiment number                            | 1     | 2      | 3     | 4     | 5     |
|--|-------|--------|-------|-------|-------|
| Actual etching depth $H$                     | 645   | 1123   | 670   | 711   | 908   |
| Etching depth by time measurement $h_1$      | 699.8 | 1227.0 | 730.9 | 754.4 | 975.2 |
| Etching depth by real-time measurement $h_2$ | 639.5 | 1134.4 | 663.4 | 705.2 | 916.3 |

表 1 中

$$\max\left(\frac{h_1 - H}{H}\right) = 9.3/100 \quad (1)$$

$$\max\left(\frac{h_2 - H}{H}\right) = 0.98/100 \quad (2)$$

(1)式表明,时间控制法控制蚀深误差较大。(2)式表明,采用本文实时检测系统控制蚀深,精度有较大提高。

采用位相平衡设计法设计二元微透镜<sup>[4]</sup>(波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , 直径  $d = 55.88 \mu\text{m}$ , 焦距  $f = 550 \mu\text{m}$ )。将图形制作在以光学玻璃为衬底(厚  $0.5 \text{ mm}$ , 面积为  $30 \times 20 \text{ mm}^2$ )的光致抗蚀剂(AZ1350)上(图形为  $400 \times 250$  个同心圆, 每个同心圆的半径为  $r_1 = 18.656 \mu\text{m}$ ;  $r_2 = 26.383 \mu\text{m}$ ;  $r_3 = 32.313 \mu\text{m}$ ;  $r_4 = 37.312 \mu\text{m}$ )。应刻蚀的深度为  $\tau = \frac{\lambda}{2(n-1)}$ , 实验中  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $n = 1.46$ ,  $\tau = 687.8 \text{ nm}$ 。在离子束刻蚀过程中,实时检测系统测得刻蚀深度  $687.8 \text{ nm}$  后,停止刻蚀。取出二元器件并除去残余掩膜。用膜层厚度台阶仪测得直线标记刻蚀深度为  $698.4 \text{ nm}$ , 蚀深控制误差为  $1.5\%$ , 比(2)式的值稍大,可能是由于所刻蚀的二元器件尺寸较大离子束在二元器件与参考片范围内不均匀所致。

图 2 为二元微透镜的显微照片。

### 3 衍射效率的测量

对孔径微小的微透镜而言, 直接对单个微透镜的衍射效率进行测量比较困难. 为测量微透镜的衍射效率, 我们考察图 3 中两个正对微透镜  $A$  和  $B$  组成的系统 ( $A$  的第二焦点与  $B$  的第一焦点重合) 的衍射效率  $\eta$  与微透镜  $B$  的衍射效率  $\eta_2$  间的关系.

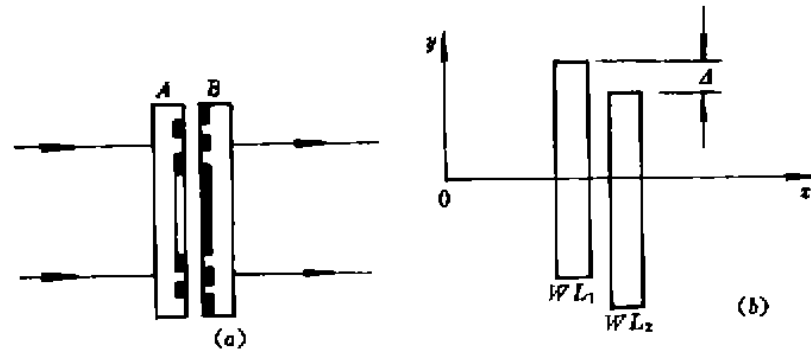


图 3 衍射微透镜  $A$  和  $B$

Fig. 3 Diffractive microlenses  $A$  and  $B$

对二元微透镜, 第  $m$  主带半径为  $r_m^2 = mr_1^2 = m \cdot 2\lambda f, m = 1, 2, \dots, M$

量化带数为

$$M = R^2 / (2\lambda f)$$

第  $m$  主带  $l$  子带半径为  $r_{m,l}^2 = r_1^2 \cdot [(m-1) + l/L]$   $l = 1, 2, \dots, L$

第  $l$  子带的刻蚀深度  $\tau(l)$  为  $\tau(l) = \frac{\lambda}{n-1} \cdot \frac{l-1}{L}$   $l = 1, 2, \dots, L$  (3)

$L$  为量化级数,  $n$  为材料折射率. 二元微透镜的位相函数  $f(r^2)$  为旋转对称的周期函数. 可表示为

$$f(r^2) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[ \frac{r^2 - (m-1)r_1^2 - (l-1)r_1^2/L - r_1^2/2L}{r_1^2/L} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-2\pi(l-1)i}{L} \right] \quad (4)$$

将  $f(r^2)$  用球面波展开:  $f(r^2) = \sum_i A_i \exp \left( -i \cdot 2\pi n \frac{r^2}{r_1^2} \right)$ , 展开系数为  $f(r^2)$  在任一周期内的积分 (这里取  $m=1$ )

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1}{r_1^2} \int_0^{r_1^2} f(r^2) \cdot \exp \left( i \cdot 2\pi n \frac{r^2}{r_1^2} \right) d(r^2) \\ &= \frac{1}{r_1^2} \sum_{l=1}^L \int_0^{r_1^2} \text{rect} \left[ \frac{r^2 - (l-1)r_1^2/L - r_1^2/2L}{r_1^2/L} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-i2\pi(l-1)}{L} \right] \cdot \exp \left( \frac{i2\pi n r^2}{r_1^2} \right) d(r^2) \\ &= \exp \left( \frac{i n \pi}{L} \right) \cdot \exp \left[ \frac{-i\pi(n-1)}{L} \right] \cdot \exp [i\pi(n-1)] \cdot \text{sinc} \left( \frac{n}{L} \right) \cdot \frac{\text{sinc}(n-1)}{\text{sinc}[(n-1)/L]} \\ &= \exp \left[ i\pi \left( k + \frac{1}{L} \right) \right] \cdot \text{sinc} \left( k + \frac{1}{L} \right) \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (n = kL + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

现在, 用单位振幅平面波垂直入射  $A$ , 在  $A$  后表面处的复振幅为

$$U(x, y) = f(r^2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k \cdot \exp \left[ -2\pi i \frac{kL+1}{r_1^2} (x^2 + y^2) \right]$$

$$= \sum_{k=0, \pm 1, \dots} \exp\left[i\pi\left(k + \frac{1}{L}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left(k + \frac{1}{L}\right) \cdot \exp\left[-2\pi i \frac{kL + 1}{r_1^2}(x^2 + y^2)\right]$$

这表示一系列的会聚与发散球面波,会聚(发散)中心在  $F = \frac{r_1^2}{2\lambda(kL + 1)}$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

各球面波的归一化能量表达式为  $\eta_k = |A_k|^2 = \text{sinc}^2(k + 1/L)$ 。在  $k = 0$  级得会聚球面波的主焦点位置  $F = \frac{r_1^2}{2\lambda}$ , 衍射效率  $\eta_1 = \text{sinc}^2(1/L)$ 。

单位振幅平面波垂直入射  $A$  后,  $k = 0$  级会聚球面波传至  $B$  前表面处的复振幅为

$$u_1(x, y) = U_0 \cdot \frac{f_1}{f_2} = \frac{f_1}{f_2} \cdot \text{sinc}\left(\frac{1}{L}\right) \cdot \exp\left(\frac{i\pi}{L}\right) \cdot \exp\left[\frac{-i2\pi(x^2 + y^2)}{r_1^2}\right]$$

此波传至  $B$  后表面处的复振幅为

$$u_2(x, y) = u_1(x, y) \cdot f(r^2)$$

$$= \frac{f_1}{f_2} \sum_{k=0, \pm 1, \dots} \text{sinc}\left(\frac{1}{L}\right) \cdot \text{sinc}\left(k + \frac{1}{L}\right) \cdot \exp\left[i\pi\left(k + \frac{2}{L}\right)\right] \cdot \exp\left[-2\pi i \frac{kL + 2}{r_1^2}(x^2 + y^2)\right]$$

上式也表示一系列的会聚与发散球面波,会聚(发散)中心在  $F = \frac{r_1^2}{2\lambda(kL + 2)}$ 。在  $k = -2/L$  时,  $F = \infty$ , 为平面波。平面波衍射效率为

$$\eta = \frac{f_1^2}{f_2^2} \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{1}{L}\right) \cdot \text{sinc}^2\left(-\frac{1}{L}\right) = \frac{f_1^2}{f_2^2} \cdot \eta_1^2$$

因此,若  $f_1 = f_2$ , 则二元微透镜  $B$  的衍射效率  $\eta_2$  与衍射效率  $\eta$  之间有关系式  $\eta_2 = \sqrt{\eta}$ 。

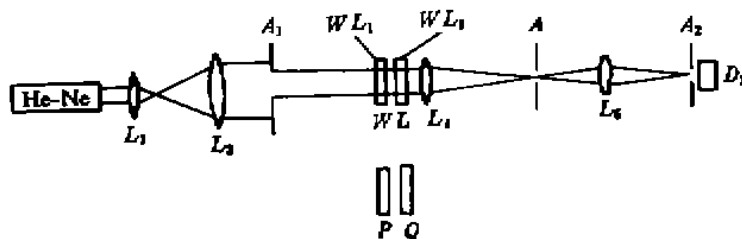


图4 衍射效率的测量装置

Fig. 4 Measurement setup of diffraction efficiency

为此,我们设计了图4所示的实验装置。图4中,氦氖激光扩束后,经光阑  $A_1$ ,  $WL$  (由两块正对微透镜列阵  $WL_1$  与  $WL_2$  组成,  $WL_2$  为图2所示的微透镜列阵,微透镜列阵  $WL_1$  与  $WL_2$  所用掩膜及基底材料相同,仅光致抗蚀剂采用反胶)、透镜  $L_4$ 、针孔滤波器  $A$ 、透镜  $L_5$ 、光阑  $A_2$ , 由探测器  $D_1$  测量光强。

根据参考文献[5],当两块正对微透镜列阵  $WL_1$  与  $WL_2$  的相对偏移量  $\Delta = 0$  时(见图3(b)),  $x$  方向的光强最大。这表明,当图4中两块微透镜列阵  $WL_1$  与  $WL_2$  的偏移量  $\Delta = 0$  时,探测器  $D_1$  上有最大光强。

测量时,调整图4中光阑  $A_1$ , 使入射到  $WL$  上的光束全部落在二元微透镜列阵范围内。移去  $WL$ , 换上两块正对、且与  $WL_1$  和  $WL_2$  的材料与厚度均相同的平行平板  $P$  和  $Q$ 。测出  $D_1$  上光强  $I_1$  后,移去平行平板  $P$  和  $Q$ , 重新置入  $WL$ , 并微调  $WL$  中  $WL_2$ , 使  $WL_2$  在  $x$  与  $y$  方向相对于  $WL_1$  偏离量分别为零(观察探测器  $D_1$  测出的光强值,在其达到最大时,停止该方向的微调),测出  $D_1$  上

光强  $I_2$ 。则衍射效率为  $\eta = \frac{I_2}{I_1} \times 100\%$ ,  $\eta_2 = \sqrt{\eta} = \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \times 100\%$ , 测得  $\eta_2 = 32.7\%$ 。

## 4 讨 论

在  $L = 2$  时,  $\eta_2 = \text{sinc}^2(1/L) = 40.5\%$ , 而实验值  $\eta_2 = 32.7\%$ , 实验值与理论值有一差距, 引起这一差距的主要因素是否为刻蚀深度误差呢? 为此, 引入误差因子  $\delta$  的概念, 在  $L = 2$  时, 将(3)式修改为

$$\tau(l) = \delta \cdot \frac{\lambda}{n-1} \cdot \frac{l-1}{2} \quad l = 1, 2 \quad (6)$$

(6)式中, 当  $\delta = 1$  时, 刻蚀深度误差为零; 当  $\delta = 1 + d\delta$  时, 刻蚀深度  $\tau(l) = \tau + d\tau$ , 刻蚀深度误差为  $d\tau$ . 这样, (4)式成为

$$f(r^2) = \sum_{m=1}^2 \sum_{l=1}^2 \text{rect} \left[ \frac{r^2 - (m-1)r_1^2 - (l-1)r_1^2/2 - r_1^2/4}{r_1^2/2} \right] \cdot \exp \left[ \frac{-2\delta\pi(l-1)i}{2} \right] \quad (7)$$

将(7)式代入(5)式后, 经类似的推导得

$$A_1 = \exp \left( \frac{i\pi}{2} \right) \cdot \exp \left[ \frac{-i\pi(n-\delta)}{2} \right] \cdot \exp [i\pi(n-\delta)] \cdot \text{sinc} \left( \frac{n}{2} \right) \cdot \frac{\text{sinc}(n-\delta)}{\text{sinc}[(n-\delta)/2]}$$

因此, 单位振幅平面波垂直入射微透镜后各衍射球面波的归一化能量表达式为  $\eta_n = |A_1|^2 = \text{sinc}^2 \left( \frac{n}{2} \right) \cdot \frac{\text{sinc}^2(n-\delta)}{\text{sinc}^2[(n-\delta)/2]}$ , 因此

$$\eta_2 = \text{sinc}^2 \left( \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\text{sinc}^2(1-\delta)}{\text{sinc}^2[(1-\delta)/2]}$$

将  $\delta = 1 + d\delta$  代入上式得

$$\eta_2 = \text{sinc}^2 \left( \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{\text{sinc}^2(d\delta)}{\text{sinc}^2(d\delta/2)} \quad (8)$$

图 5 为依据(8)式作出的  $\eta_1$  与  $d\delta$  的关系曲线。

由图 5 可见,  $\eta_2$  受  $d\delta$  (即  $\frac{\lambda}{n-1} \cdot \frac{l-1}{2} \cdot d\tau$ ) 的影响十分明显, 在  $d\delta$  增至一定值时,  $\eta_2$  甚至为零, 并呈周期性变化。有趣的是, 当  $d\delta$  超过某一值并继续增大时,  $\eta_1$  又开始回升到  $d\delta = 0$  时的  $\eta_1$  之值。

将刻蚀深度误差  $d\tau = 10.6 \text{ nm}$  代入(8)式中得  $\eta_2 = 40.3\%$ , 与  $\eta_2$  的理论值相近。可见, 本文刻蚀深度误差对衍射效率的影响很小。引起本文衍射效率测量值与理论值有一差距的主要因素可能是: 实验中, 两块二元微透镜阵列的偏离量  $\Delta$  不严格为零; 激光能量在测量过程中有变化。为提高本文衍射效率测量准确度, 对放置  $WL_1$  和  $WL_2$  的调整架有较高要求, 同时, 激光器输出的激光能量稳定性要好。

实验证实了运用离子束刻蚀二元器件的可行性。实验中发现, 在离子束刻蚀二元器件过程中, 离子束刻蚀时间不能过长(时间过长后, 真空环境对光致抗蚀剂上微米级二元图形的影响就会加重, 从而降低二元器件的衍射效率)。本文从三个方面进行了尝试: 1. 选择最佳工艺参数, 提高束流密度; 2. 刻蚀过程中使用辅助气体  $\text{F}_{12}$  (二氟二氯甲烷) 以提高了刻蚀速率(在  $E = 550 \text{ eV}$ ,  $J = 1 \text{ mA/cm}^2$  实验条件下, 刻蚀速率提高近五分之二); 3. 真空室中使用水冷系统。

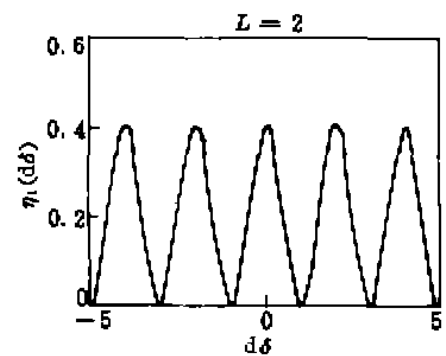


图 5  $\eta_1$  与  $d\delta$  的关系曲线

Fig. 5 The curve shows the relationship of  $\eta_1$  and  $d\delta$

结果表明,刻蚀时间显著缩短,真空室中温度基本恒定。

本文由于采用了刻蚀深度实时检测系统,刻蚀精度较时间控制法有较大提高。在该系统中,要求刻蚀离子束在二元器件及参考片范围内都应均匀,这在一定程度上限制了二元器件的尺寸。如何解决这一问题,有待于进一步的研究。

### 参 考 文 献

- 1 A. W. Loffmann, J. A. Thomas. Making an array illuminator based on the Talbot effect. *Appl. Opt.*, 1990, 29 : 4337
- 2 Anil K. Jain. Binary optics for beam splitting and laser beam scanning. *Laser & Optronics*, 1994, 13(10) : 72
- 3 赵光兴,杨国光,陈洪琴. 提高考夫曼型离子源束流密度的研究. *真空电子技术*, 1995, 198(5) : 13
- 4 夏向亮,杨国光. 二元微透镜的位相平衡设计及叠加积分衍射分析. *光学学报*, 1994, 14(3) : 296
- 5 Michael W. Farn. Agile beam steering using phased-array-like binary optics. *Appl. Opt.*, 1994, 33(22) : 5151

## Ion Beam Etching of Binary Optics Microlens Arrays and the Test of Diffraction Efficiency

Zhao Guangxing Yang Guoguang Chen Hongqiu Hou Xiyun

(Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** A binary optics microlens array (BM) was fabricated by using ion beam etching. The real-time test of etching depth in vacuum environment was performed. A novel method of measuring the BM diffraction efficiency was presented.

**Key words** microlens array, ion beam etching, diffraction efficiency