

离子束蚀刻微透镜中蚀刻深度 允许误差的研究*

赵光兴¹⁾ 陈洪²⁾ 杨国光²⁾

1), 华东冶金学院自动化系, 马鞍山 243002

2), 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027

摘 要 基于衍射光学原理, 获得了微透镜的衍射效率与蚀刻深度误差之间的关系式。研究表明, 离子束蚀刻中目前采用的时间控制法可满足 $L = 1$ 时的微透镜微加工要求, 但未能满足 $L > 1$ 时的微透镜微加工要求。对 $L > 1$ 的情形, 需要提高蚀刻深度控制精度以使蚀刻深度的误差小于 87 nm。

关键词 微透镜, 离子束蚀刻, 误差。

1 引 言

用二元光学方法制作微透镜^[1]主要制作工艺可分为 4 步: 1) 图形设计; 2) 图形发生; 3) 图形转移; 4) 蚀刻。在这 4 步工艺中, 蚀刻是重要的环节, 直接影响到微透镜的成本与质量。本文对离子束蚀刻微透镜中蚀刻深度的允许误差进行了探讨。

2 蚀刻深度的误差

二元微透镜第 m 主带半径为

$$r_m^2 = mr_1^2 = m2Nf, \quad m = 1, 2, \dots, M$$

量化带数为

$$M = R^2/(2Nf)$$

第 m 主带第 l 子带半径为

$$r_{m,l}^2 = r_1^2[(m-1) + l/2^l], \quad l = 1, 2, \dots, 2^l$$

L 为离子束套刻次数。第 l 子带蚀刻深度为

$$h(l) = h + dh,$$

$h = [N/(n_0 - 1)](l - 1)/2^l$ 为理论要求的蚀刻深度, dh 为实际蚀刻深度与理论蚀刻深度的偏差, n_0 为材料折射率。

目前采用的离子束蚀刻深度时间控制法, 基于蚀刻深度除以蚀刻速率等于蚀刻时间的原

* 国家自然科学基金、安徽省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-04-24

理, 通过控制蚀刻时间的长短获得所需的蚀刻深度, 因此蚀刻深度的误差来源于材料的蚀刻速率误差以及蚀刻时间的误差。若蚀刻时间误差可以忽略, 则蚀刻深度误差与蚀刻时间近似成正比, 设第 $L-1$ 次离子束套刻深度最大误差为 dh_{L-1} , 则第 L 次离子束套刻深度最大误差为 $dh_{L-1}/2$ (第 L 次离子束套刻深度为第 $L-1$ 次离子束套刻深度的一半)。

对 $L=2$ 情形, 第一次套刻对 $l=3, 4$ 进行, 套刻深度为 $\lambda/2(n_0-1)+dh_1$, 第二次套刻对 $l=2, 4$ 进行, 套刻深度为 $\lambda/4(n_0-1)+dh_1/2$, 各 l 子带蚀刻深度误差为 $(l-1)dh_1/2$ 。对 $L=3, 4, 5$ 的情形可依此类推。由此可以推得第 l 子带蚀刻深度最大误差 dh 与第一次套刻深度最大误差 dh_1 之间的关系为

$$dh = \frac{l-1}{2^{L-1}} dh_1 \quad (1)$$

3 微透镜的衍射效率

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

$$f(r^2) = \sum_{m=1}^M \sum_{l=1}^L \text{rect} \left[\frac{r^2 - (m-1)r_1^2 - (l-1)r_1^2/2^l - r_1^2/2^{L+1}}{r_1^2/2^L} \right] \exp \left[\frac{-j2\pi(n-1)h(l)}{\lambda} \right]$$

将 $f(r^2)$ 用球面波展开:

$$f(r^2) = \sum_n A_n \exp(-j2\pi nr^2/r_1^2)$$

展开系数为 $f(r^2)$ 在任一周期内的积分(这里取 $m=1$):

$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{r_1^2} \int_0^{r_1^2} f(r^2) \exp(j2\pi nr^2/r_1^2) d(r^2) = \\ &= \frac{1}{r_1^2} \sum_{l=1}^L \int_0^{r_1^2} \text{rect} \left[\frac{r^2 - (l-1)r_1^2/2^l - r_1^2/2^{L+1}}{r_1^2/2^L} \right] \exp \left[\frac{-j2\pi(n-1)h(l)}{\lambda} \right] \exp \left(\frac{j2\pi nr^2}{r_1^2} \right) d(r^2) = \\ &= \exp \left(\frac{j\pi n}{2^L} \right) \exp \left[\frac{-j\pi(n-\delta)}{2^L} \right] \exp [j\pi(n-\delta)] \sin c \left(\frac{n}{2^L} \right) \frac{\sin c[(n-\delta)/2^L]}{\sin c[(n-\delta)/2^L]} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\delta = 1 + 2(n_0 - 1)dh_1/\lambda$ 。

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

$$\eta_n = |A_n|^2 = \sin^2 c \left(\frac{n}{2^L} \right) \frac{\sin^2 c[(n-\delta)/2^L]}{\sin^2 c[(n-\delta)/2^L]}$$

$n=1$ 对应会聚于主焦点的衍射球面波。

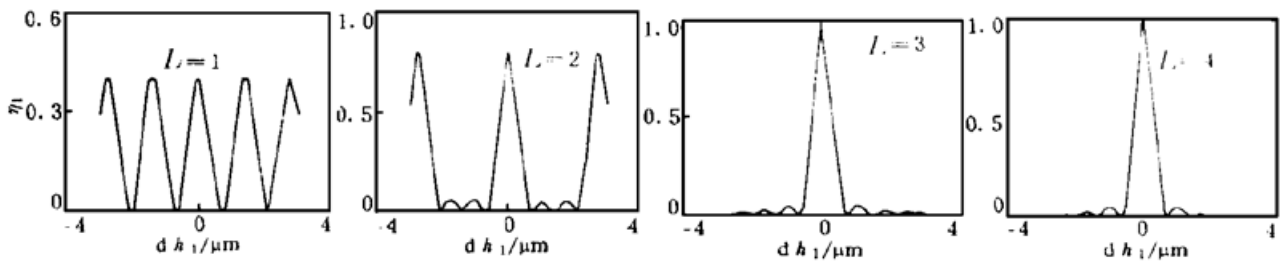
定义微透镜衍射效率为微透镜主焦点处衍射球面波能量与入射平面波能量之比, 则微透镜的衍射效率为

$$\eta_1 = \sin^2 c \left(\frac{1}{2^L} \right) \frac{\sin^2 c[(1-\delta)/2^L]}{\sin^2 c[(1-\delta)/2^L]} = \sin^2 c \left(\frac{1}{2^L} \right) \frac{\sin^2 c[2(n_0-1)dh_1/\lambda]}{\sin^2 c[2(n_0-1)dh_1/(\lambda 2^L)]} \quad (3)$$

4 讨 论

由(3)式得衍射效率 η_1 与离子束套刻深度误差 dh_1 之间模拟关系曲线如图 1。

图 1 表明, 离子束套刻深度误差 dh_1 对微透镜衍射效率 η_1 的影响较大, 在 dh_1 达到一定值时 η_1 甚至为零。在微米级微透镜的离子束蚀刻中, 蚀刻深度误差小于 $0.5 \mu\text{m}^{[2]}$, 在图 1 中,

Fig. 1 The curve of η_1 and dh_1

$dh_1 < 0.5 \mu\text{m}$ 时, η_1 随 $d\eta_1$ 单调下降, 定义使 η_1 下降 5% 对应的 dh_1 值为微光学元件离子束蚀刻中蚀刻深度允许误差(用 τ 表示), 则由(3) 式可算得 $L = 1, 2, 3, 4$ 时, $\tau = 158 \text{ nm}, 99 \text{ nm}, 89 \text{ nm}, 87 \text{ nm}$ 。

在 $30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 玻璃衬底上蒸镀 150 nm 厚铬膜, 再在铬膜上形成 400×250 个二元微图形, 每个微图形为同心圆(设计方法见参考文献[3]):

$$r_1 = 18.656 \mu\text{m}; \quad r_2 = 26.383 \mu\text{m}; \quad r_3 = 32.313 \mu\text{m}; \quad r_4 = 37.312 \mu\text{m}$$

其中 $r_2 - r_1$ 与 $r_4 - r_3$ 为去铬部分, 以制作微透镜列阵, 同时在边缘处形成 $0.5 \mu\text{m}$ 线宽直线标记。取衬底边角材料, 在 $E = 550 \text{ eV}, J = 1 \text{ mA/cm}^2$ 实验条件下, 测得衬底蚀刻速率为 19 nm/min 。

在 $E = 550 \text{ eV}, J = 1 \text{ mA/cm}^2$ 实验条件下, 对样品进行蚀刻, 然后取出样品, 除去掩膜, 用 α 台阶仪测得直线标记的蚀刻深度, 结果如表 1 所示。

Table 1. Etching depth

experiment number	1	2	3	4	5
actual etching depth/nm	645	1123	670	711	908
etching depth by time/nm	699.8	1227.0	730.9	754.4	975.2

表 1 中, 最大蚀刻深度误差为 104 nm , 对照(3) 式算得的 $L = 1, 2, 3, 4$ 时 $\tau = 158 \text{ nm}, 99 \text{ nm}, 89 \text{ nm}, 87 \text{ nm}$ 知, 目前微光学元件离子束蚀刻中采用的蚀刻深度时间控制法可满足 $L = 1$ 时的微加工要求, 但不满足 $L = 2, 3, 4$ 时的微加工要求。对 $L = 2, 3, 4$ 的情形, 需寻求新的蚀刻深度控制方法以提高蚀刻深度的控制精度, 使蚀刻深度的误差小于 87 nm 。

文献[4]采用光学薄片作离子束蚀刻深度敏感元件对此进行了探索: 采用 He-Ne 激光束照射光学薄片以在其下表面形成干涉条纹, 将敏感元件与待蚀刻的微光学元件一同置于离子束中进行蚀刻, 当薄片上表面被向下蚀刻时, 薄片的厚度将变化, 下表面的干涉条纹将移动, 由于条纹的移动与蚀刻深度间有确定的关系, 从而将蚀刻深度信息转化成条纹移动的光学信息(由于薄片表面两相干光束共路, 因此条纹稳定)。研究表明: 如采用高分辨率的 CCD 对干涉条纹进行检测并采用高精度的台阶仪进行定标, 则可有很高的测量精度。此法不利因素在于, 由于需将敏感元件与待刻蚀的微结构一同置入离子束中进行刻蚀, 这对宽束离子束的均匀性提出了要求。

参 考 文 献

- [1] 赵光兴, 杨国光, 陈洪 等. 宽离子束刻蚀微透镜阵列研究. 微细加工技术, 1995, (1): 21~ 24
- [2] 赵光兴. 微结构的荷能离子束刻蚀理论与技术研究. [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1996. 86
- [3] 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~ 302
- [4] 赵光兴, 陈洪 , 侯西云等. 微加工中一种新型蚀刻深度实时检测系统. 光学学报, 1997, 17(6): 745 ~ 749

Acceptable Error of Etching Depth in Ion Beam Etching Microlens

Zhao Guangxing¹⁾ Chen Hongqiu²⁾ Yang Guoguang²⁾

1), *Department of Industrial Automation, East China Institute of Metallurgy, Ma'anshan 243002*
2), *State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027*

(Received 24 April 1998)

Abstract Based on the diffraction optical principle, a formula of the diffraction efficiency and etching depth error of the microlens is obtained. The results show that the time control method of ion beam etching meets the needs of micro-fabrication of $L = 1'$ s microlens and the etching depth error should be smaller than 87 nm in the micro-fabrication of $L > 1'$ s microlens.

Key words microlens, ion beam etching, error.