

# 微加工中一种新型刻蚀深度实时检测系统\*

赵光兴<sup>1</sup> 陈洪<sup>2</sup> 候西云<sup>2</sup> 程上彝<sup>2</sup> 杨国光<sup>2</sup>

1. 华东冶金学院自动化系, 马鞍山 243002
2. 浙江大学光科系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027

**摘 要** 实现了一种新型刻蚀深度实时检测系统, 整个系统对温度漂移, 气体流动与外界振动等环境因素极不敏感, 系统测量误差小于 0.98%, 实现了在真空环境下刻蚀深度的实时监视与检测, 对二元光学微加工具有现实意义。

**关键词** 二元光学, 离子束刻蚀。

## 1 引 言

二元光学元件在国防、科研及民用等方面都显示了广阔的应用前景, 其制造工艺中蚀刻是重要的环节, 直接影响到二元光学元件的成本与质量。而这一环节也是我国目前二元光学研究中急需加强的。

离子束刻蚀分辨率极高, 刻蚀图形极限可达  $0.008 \mu\text{m}^{[1]}$ , 无侧向扩蚀, 适于刻蚀微米、亚微米级微光学图形。实验表明<sup>[2, 3]</sup>, 运用离子束刻蚀二元光学图形是十分可行的。目前的问题是: 刻蚀深度难以精确控制。由于刻蚀二元光学图形的特殊性, 一些在微电子工业中已采用的终点检测方法<sup>[4]</sup>, 在刻蚀二元光学图形中无法采用。目前都采用时间控制法(刻蚀深度除以刻蚀速率等于刻蚀时间)。由于刻蚀速率与多种因素有关, 在刻蚀过程中很难保持定值, 因此误差较大。为了精确控制刻蚀深度, 本文设计了一种新型刻蚀深度实时检测系统。

## 2 原 理

触针式台阶仪及干涉显微镜可用于测量微台阶深度, 但却无法直接用于真空室中微台阶深度的实时测量。其主要原因是: 二元元件在微加工时表面附有抗蚀剂图形, 而用触针台阶仪或干涉显微镜测量微台阶深度时, 必须先除去抗蚀剂图形; 另外, 真空室中有温度变化、振动及刻蚀气体流动的影响, 非共路干涉系统极难获得稳定的干涉条纹, 而且刻蚀过程中, 被刻件与离子束之间不能置入任何用于测量的元件, 以免挡住用于刻蚀的离子束。

作为二元元件基底材料的光学玻璃, 其上下两个表面对光都有反射作用。本文将其上表面(刻蚀面)作为测量面, 同时, 将其下表面作为参考面(见图 1), 以使测量光路与参考光路

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69287001)

收稿日期: 1995 年 12 月 10 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 5 日

共路。根据光的波动理论,光波在空间传播应满足亥姆霍兹方程:

$$(\Delta + k^2)u = 0 \quad (1)$$

对沿  $x$  轴传播的平面波, (1) 式的解为:

$$u(x, y, z) = a \sin(\omega t - knx) \quad (2)$$

式中,  $k = 2\pi f/c$ 。因此, 图 1 中,  $S_1ABC$  光在  $C$  点的振动可写为:

$$u_1 = a_1 \sin[\omega t - kn_1 S_1A - kn_2(\overline{AB} + \overline{BC})] \quad (3)$$

式中  $n_1$  与  $n_2$  分别为图 1 中真空室内及参考片的折射率。 $S_2DC$  光在  $C$  点的振动可写为(考虑半波损失):

$$u_2 = a_2 \sin[\omega t - kn_1(\overline{S_2D} + \overline{DC} + \frac{\lambda}{2})] \quad (4)$$

由于温度变化、振动及刻蚀气体流动的影响, 折射率有随机飘移。因此, 在真空室中, (3)、(4) 两式中的  $n_1$  应分别修正为  $n_1 + \Delta n_1$  与  $n_1 + \Delta n_2$ 。设  $u$  为两者在  $C$  点的合成振动, 则有:

$$u = u_1 + u_2 = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

其中,

$$A = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta} \quad (6)$$

$$\delta = kn_2(\overline{AB} + \overline{BC}) - k(n_1 + \Delta n_2) \overline{DC} - \pi - k(n_1 + \Delta n_1) \overline{S_1A} - k(n_1 + \Delta n_2) \overline{S_2D} \quad (7)$$

在图 1 中,

$$\begin{aligned} \overline{AB} \approx \overline{BC} &= h/\cos \beta, & \overline{DC} &= 2h \operatorname{tg} \beta \sin \alpha, \\ \overline{S_1A} &= \overline{S_2D}, & (n_1 + \Delta n_2) \sin \alpha &= n_2 \sin \beta \end{aligned}$$

所以(7)式变为:

$$\delta = 2kn_2h \cos \alpha - \pi + k(\Delta n_1 - \Delta n_2) \overline{S_1A} \quad (8)$$

由(6)式,  $C$  点处的光强  $I_c$  为:

$$I_c = A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \delta$$

$u_1$  与  $u_2$  均从同一激光器中发出, 可认为  $a_1 = a_2 = a$ , 这样上式变为:

$$I_c = 4a^2 \cos^2(\delta/2) \quad (9)$$

## 2.1 真空环境对光强的影响

在离子束刻蚀过程中, (8) 式右边的  $h$  与  $(\Delta n_1 - \Delta n_2)$  均为变量因子, 把  $\Delta n_1 - \Delta n_2 = N$ , 代入(8)式, 并对(8)式两边微分得:

$$d\delta(h, N) = 2kn_2 \cos \alpha dh + k \overline{S_1A} dN \quad (10)$$

对(9)式两边微分得:

$$\begin{aligned} dI_c &= 2a^2 \sin \delta d\delta = 4kn_2a^2 \sin(2kn_2h \cos \alpha - \pi + kN \overline{S_1A}) \cos \alpha dh \\ &\quad + 2ka^2 \sin(2kn_2h \cos \alpha - \pi + k \overline{S_1A}) \overline{S_1A} dN \end{aligned} \quad (11)$$

(11) 式表明, 除玻璃厚度的改变之外, 真空环境的改变也将引起光强的变化, 这使得通过光强来测量玻璃厚度的改变无法进行。

## 2.2 刻蚀深度的表达式

在本系统中, 由于实现了共路, 在真空中任何时刻,  $\Delta n_1 = \Delta n_2$ , 这样, (11) 式变成,

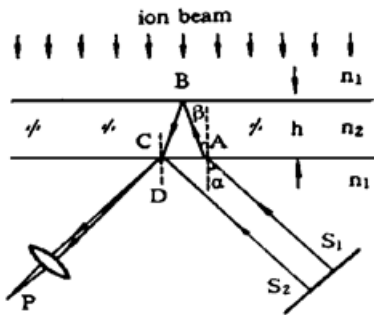


Fig. 1 Reflection of light at a thin glass

$$dI_c = 4kn_2a^2 \sin(2kn_2h \cos \alpha - \pi) \cos \alpha dh \quad (12)$$

(12) 式表明, 在本系统中, 真空环境的改变对光强没有影响, 光强的变化仅由玻璃厚度的改变引起, 这使得通过光强来测量刻蚀深度成为可能。

由于  $\Delta n_1 = \Delta n_2$ , (9) 式可写成

$$I_c = 4a^2 \cos^2(kn_2h \cos \alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

(13) 式中, 当  $h$  变化  $3\lambda/4n_2 \cos \alpha$  时,  $I_c$  正好变化一个周期。这在整个干涉图样上表现为: 当考察点厚度  $h$  下降  $3\lambda/4n_2 \cos \alpha$  时, 干涉图样移动一个条纹。设光学玻璃上下两表面间的夹角为  $\theta$  (绝对平行在工艺上是无法做到的), 则其上表面下降的厚度  $\Delta h$  与条纹在上表面移动的距离  $\Delta l$  间有关系式:

$$\sin \theta = \Delta h / \Delta l$$

即:

$$\Delta l = (1/\sin \alpha) \Delta h$$

这表明,  $\Delta l$  与  $\Delta h$  之间是线性关系, 通过测量条纹的移动距离可以获得表面下降的厚度值。在图 2 中, 线阵探测器 D 采用美国仙童公司的  $256 \times 1$  CCD111A。采用自行设计的时钟驱动电路, 视频输出频率 80 kHz。由于条纹移动缓慢(在  $E = 550 \text{ eV}$ ,  $J = 1 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$  实验条件下, 移动一个条纹约需十六分钟), 采用分时数据采集。CCD 视频输出信号经低通滤波, 采样保持与 A/D 转换后, 被计算机读入内存进行处理。设相邻两条纹最大值对应的地址分别为  $m$  与  $n$ , 设在刻蚀过程中条纹最大值地址位移值为  $\Delta m$ , 根据上面的讨论, 刻蚀深度  $\tau$  可由下式求出:

$$\frac{\tau}{3\lambda/4n_2 \cos \alpha} = \frac{|\Delta m|}{|m - n|} \quad (14)$$

### 3 系统试验

实验装置如图 2 所示, 激光束光斑尺寸约 3 mm, 而二元元件图形的线宽在微米级。直接将激光束对准二元元件进行测量是不行的。为解决这一问题, 将表面附有抗蚀剂图形的二元元件与和此二元元件基底材料完全相同的透明薄板(图 2 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)。

图 2 中, 为避免真空室透明窗 E 的前后两个表面的干涉条纹进入测量光路, 将光路斜入射与斜出射 E, 另外, 所用的四块平面反射镜均采用全反镜(背面为漫反射面)。

刻蚀前, 应先对(14)式中左边的分母进行定标。将测试薄片置入工作台进行刻蚀, 使条纹位移值  $|\Delta m| = |m - n|$ , 取出测试片, 用干涉显微镜测出蚀深, 此值等于(14)式中左边的分母。

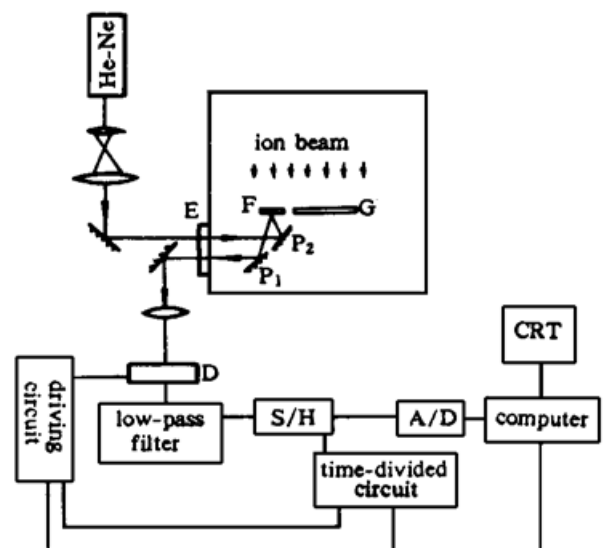


Fig. 2 Schematic diagram of real-time etching depth measurement system

采用时间控制法和本文提出的实时检测系统控制蚀深,对光学玻璃进行刻蚀。并与用干涉显微镜测量的实际蚀深进行比较。结果如表 1 所示。

Table 1. Etching depth comparison (unit: 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 $h_1$ by time	699.8	1227.0	730.9	754.4	975.2
etching depth $h_2$ by real-time measurement	639.5	1134.4	663.4	705.2	916.3

表 1 中,

$$\max \left( \frac{|h_1 - H|}{H} \right) = 9.3\% \quad (15)$$

$$\max \left( \frac{|h_2 - H|}{H} \right) = 0.98\% \quad (16)$$

(15) 式表明,时间控制法控制蚀深误差较大。(16) 式表明,采用本文实时检测系统控制蚀深,精度有较大提高。

## 4 讨 论

记干涉显微镜标定值  $3\lambda/4n_2 \cos \alpha = \tau_0$ , 显然,  $\tau_0$  与入射角  $\alpha$  有关。为减少系统的测量误差,入射角  $\alpha$  在实际测量时与定标时应相同。由全微分概念及(14)式,有:

$$d\tau = \frac{|\Delta m|}{|m - n|} d\tau_0 + \frac{\tau_0}{|m - n|} d|\Delta m| - \frac{|\Delta m| \tau_0}{|m - n|^2} dm + \frac{|\Delta m| \tau_0}{|m - n|^2} dn \quad (17)$$

由(17)式可见,本系统的测量不确定度  $d\tau$  与 CCD 系统的分辨率及干涉显微镜的测量不确定度  $d\tau_0$  均有关。如采用  $1024 \times 1$  CCD 探测器和采用高速 A/D 转换与计算机 DMA 数据传送,则可进一步降低本系统的测量不确定度。

某些干涉显微镜的测量光路与参考光路是分开的,在本系统里,测量光路与参考光路实现了共路;在平板类干涉中,对平板厚度  $h$  的测量主要根据平板表面上条纹的弯曲量  $b$  及条纹的间距  $c(h = b\lambda/c)$  决定,在本文系统里,参考片 F 上表面的下降值(即刻蚀的深度),是通过(14)式来测量的。因此,本文系统是一种新型实时测量系统。

本文由于干涉体系中参考光路与测量光路实现共路,整个系统对温度漂移、气体流动及外界振动等环境因素极不敏感,干涉条纹非常稳定,实现了在真空环境下的微加工实时监视与检测。系统相对测量误差小于 0.98%,满足刻蚀微米、亚微米级二元光学图形的要求。

(17) 式的讨论表明,本系统的进一步改进,测量精度还可进一步提高。另外,系统中采用了参考片,这对宽束离子束的均匀性提出了要求,不仅在二元器件范围内要均匀,包括测试片在内也应均匀,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] 范玉殿, 电子束和离子束加工. 北京, 机械工业出版社, 1989: 35
- [2] 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, **43**(1): 21~ 24
- [3] 赵光兴, 杨国光, 陈洪 等, 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~ 16
- [4] P. Lolodner, A. Katzir, N. Hartsough, End-point detection and etch-rate measurement during reactive ion etching using fluorescent polymer films. *J. Vacuum Sci. & Technol.*, 1983, **B1**(2): 50~ 61

## A Novel Real-Time Etching Depth Testing System for Micro-Fabrication

Zhao Guangxing<sup>1</sup>    Cheng Hongqiu<sup>2</sup>    Hou Xiyun<sup>2</sup>

Cheng Shangyi<sup>2</sup>    Yang Guoguang<sup>2</sup>

1. Department of Industrial Automation, East China Institute of Metallurgy, Maanshan 243002

2. Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

(Received 10 December 1995; revised 5 March 1996)

**Abstract** A novel real-time system for etching depth measurement is demonstrated. The system is not sensitive to instability, temperature variation and gaseous flow. The measurement error is small than 0.98%. We realized the real-time test of etching depth in vacuum environment. This has practical significance to binary optics micro-fabrication.

**Key words** binary optics, ion-beam etching.