

光刻全息图的蚀刻条件研究*

郭永康 郭履容 张晓春

(四川大学信息光学研究所, 成都 610064)

提 要

本文提出发展蚀刻二元元件的工艺, 其中最重要的是选择适当的蚀速比, 它是制作具有连续厚度分布的浮雕型光刻全息图的关键, 文中给出了反应功率一定时腐蚀气体流量和蚀刻速率的关系曲线, 找到了合适的工作点, 根据这些结果, 制作成功性能优良的全息光学元件。

关键词: 光刻术、全息术, 等离子蚀刻, 全息光学元件。

一、引 言

二元光学是一种新技术, 它利用计算机产生二元图样, 制作二元掩模, 然后利用超大规模集成电路工艺中的蚀刻技术制成线宽为微米或亚微米量级的表面浮雕图样, 这种技术已用于制作二元位相型衍射光学元件。

实际上, 人们经常使用的是各种能对入射波前产生连续分布的位相调制(即具有连续位相截面)的光学元件。文献[1]指出不存在能产生连续位相分布的蚀刻技术, 但是, 作者认为将全息术和光刻术相结合, 即先利用干涉光场对基片材料上的光致抗蚀剂曝光得到光致抗蚀剂全息图, 然后利用它作为“掩模”, 在适当条件下通过蚀刻, 就可在基片中生成具有连续位相截面的光刻全息图^[2]。本文提出, 为了使光致抗蚀剂中的浮雕图样高保真地传递到基片中去, 必须改变对基片材料的蚀刻速率 v_s 和对光致抗蚀剂的蚀刻速率 v_p 的比值 v_s/v_p 。文中讨论了等离子体对基片材料和光致抗蚀剂的蚀刻速率以及它们的蚀速比与放电参量的关系。测定了在一定反应功率下蚀刻气体流量和蚀刻速率的关系曲线, 找到了合适的工作点, 这些结果为选择合适的放电参量, 制作优质光刻全息图提供了依据。

二、基本 原 理

光刻全息图的形成分为两步: (1) 制作光致抗蚀剂全息图, 将物-参干涉光场的强度分布 $I(x, y)$ 转换为光致抗蚀剂层中浮雕的厚度分布 $d_p(x, y)$; (2) 通过蚀刻将 $d_p(x, y)$ 转换为基片中沟槽深度分布 $d_s(x, y)$, 光致抗蚀剂全息图线性曝光的条件已详细研究过^[3], 下面讨论等离子蚀刻的条件。

等离子蚀刻的基本原理是: 腐蚀气体分子在高频电场作用下发生电离形成等离子体, 其电离反应式一般可写为



收稿日期: 1991年3月4日; 收到修改稿日期: 1991年5月28日

* 本课题得到国家自然科学基金的资助。

式中 A_2 表示电离气体, A^+ 为正离子, e 为电子, A 为化学性质很活泼的自由基, 自由基和被蚀材料之间的化学反应对材料产生腐蚀作用, 反应生成挥发性极强的气体被抽走。

蚀刻二元元件时, 由于存在着腐蚀窗口, 蚀刻光致抗蚀剂层的速率比蚀刻基片材料的速率要小得多。通常制作光刻全息图是在玻璃或其它基底上淀积一层透明介质薄膜或金属薄膜作为基片, 由于光致抗蚀剂中浮雕全息图的连续厚度分布不存在腐蚀窗口, 而且基片上淀积的薄膜厚仅约 $1 \mu\text{m}$, 若沿用蚀刻二元图形的工艺在 $v_p \ll v_s$ 条件下蚀刻这种厚度连续变化的图形, 将会使薄膜中生成的沟槽形状产生严重失真。因此, 为了使光致抗蚀剂中的浮雕能高保真地传递到薄膜中, 必须适当地控制蚀速比 v_s/v_p 。

如图 1, x 轴表示基片上薄膜层 S 和光致抗蚀剂层 PR 的界面, 蚀刻前 PR 层中正弦形浮雕的厚度分布为

$$d_p(x) = d_0 + d_A(1 + \sin 2\pi f x), \quad (2)$$

式中 d_0 为 PR 层中底膜的厚度, d_A 为正弦形浮雕的振幅, f 为图形的空间频率。为简单计, 假设等离子体中活性粒子对表面的蚀刻方向是垂直向下的, 而且在各点的蚀刻是均匀的。经过 t 时刻后坐标为 x 处在 PR 层和 S 层中蚀刻的深度分别为

$$d_p = v_p t_1, \quad d_s = v_s t_2, \quad (3)$$

式中 t_1 和 t_2 分别为对 PR 层和 S 层的相继蚀刻的时间, 于是可得

$$t = t_1 + t_2 = (d_p/v_p) + (d_s/v_s). \quad (4)$$

在薄膜 S 中沟槽的深度分布为

$$d_s(x) = v_s t - (v_s/v_p) d_p(x), \quad (5)$$

式中蚀刻时间 t 决定蚀刻终点, 对位相型元件而言, 常量 $v_s t$ 可忽略不计, 注意到图中 d_p 和 d_s 的坐标方向相反, 上式可改写为

$$d_s(x) = (v_s/v_p) d_p(x), \quad (6)$$

(6)式表明, 薄膜 S 中沟槽深度分布是蚀速比 v_s/v_p 和 PR 层中浮雕厚度分布 $d_p(x)$ 的乘积。

(1) 若 $(v_s/v_p) = 1$, 则 $d_s(x) = d_p(x)$ 薄膜中沟槽的深度分布与光致抗蚀剂中浮雕的厚度分布完全一致;

(2) 若 $(v_s/v_p) > 1$, $d_s(x) > d_p(x)$, 薄膜中生成的浮雕图样的调制深度将增加。但是, 当 $v_s \gg v_p$ 时, 调制深度将超过薄膜厚度, 从而蚀刻产生的图形将严重失真;

(3) 若 $(v_s/v_p) < 1$, $d_s(x) < d_p(x)$, 薄膜中生成的浮雕图样的调制深度将减少。

由此可见, 在没有腐蚀窗口的条件下, 为了蚀刻具有连续厚度分布的光刻全息图, 利用腐蚀剂对光致抗蚀剂和薄膜材料的蚀刻速率不同, 控制适当的蚀速比是一个关键, 而且选择不同的蚀速比还可以得到不同的调制深度。

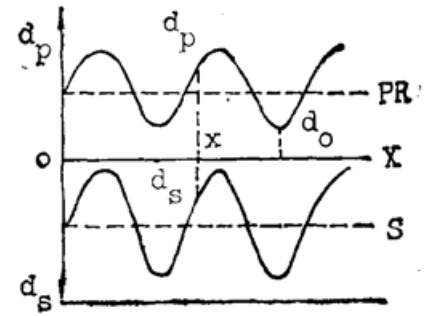


Fig. 1 Transfer of sin groove profile from PR to S

三、实 验

为了分析蚀刻条件, 找到恰当的蚀速比, 可以用光刻法制作了全息光栅, 采用玻璃板上

淀积透明介质膜作为基片,膜厚约 700 nm。光致抗蚀剂是 AZ1350 J,用 Ar^+ (457.9 nm) 或 He-Cd(441.6 nm) 激光曝光,蚀刻用 DK-P200 型等离子蚀刻机。腐蚀剂是 CF_4 和 O_2 的混合气体,加入适量的氧气是为了增加对光致抗蚀剂的蚀刻速率,得到所需的蚀速比。

Table 1

O_2 flow/ CF_4 flow	0.05	0.10	0.15	0.25	0.30
v_p ($\text{\AA}/\text{min}$)	653	1210	1689	1953	2120
v_s ($\text{\AA}/\text{min}$)	5941	5872	2928	2265	1485
v_s/v_p	9.10	4.85	1.73	1.16	0.70

文献[4]指出,等离子体对目标的蚀刻速率可由腐蚀剂的浓度和离子反应的溅射率来控制,而它们又决定于等离子体的放电参量:反应功率、气压、蚀刻气体的流量等。

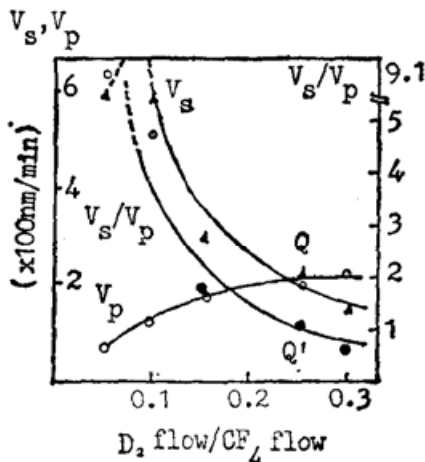


Fig. 2 v_s , v_p , v_s/v_p vs the ratio of O_2 flow and CF_4 flow

实验测定了在反应功率一定时,气体 CF_4 的流量不变,改变 O_2 的流量从而使二者的流量比变化时,相应的 v_s 、 v_p 及 (v_s/v_p) ,如表 1 所列,作出了它们之间的变化关系曲线,如图 2 所示,由图可见,随着 O_2 和 CF_4 流量比的增加, v_p 增加,而 v_s 和 (v_s/v_p) 却相应减少,这与蚀刻二元元件的要求是很不相同的,图中 v_s 和 v_p 曲线的交点 Q 对应于 $v_s=v_p$,称之为工作点。Q 点在 (v_s/v_p) 曲线上的对应点为 Q',在此曲线上 Q' 点的两侧,相应的调制深度将增加或减少,图 2 所示曲线为选择合适的放电参量,制作所需调制度的光刻全息图提供了依据,根据以上结果确定的实验条件,蚀刻成了保真度好的全息光栅、闪耀光栅和全息透镜等光学元件。

四、讨 论

(1) 根据以上分析,蚀刻具有连续位相截面的光刻全息图与蚀刻二元元件相比,前者需采用低蚀速比,而且蚀刻应在低反应功率下进行,这与通常的 VLSI 工艺是很不相同的,同时为了在低反应功率下进行蚀刻,制作光致抗蚀剂全息图的工艺也必须与之相适应。

(2) 图 3(a)、图 3(b)分别为用干涉显微镜拍摄的光致抗蚀剂光栅和相应的等离子蚀刻光栅的沟槽轮廓照片,图 3(c)为蚀刻光栅的扫描电镜照片,光栅的空间频率为 500 lp/mm,图 3(a)和图 3(b)的照片表明,光致抗蚀剂光栅经蚀刻为光刻光栅,其沟槽轮廓的传递保真度良好,而且光刻光栅的位相调制度较原版光致抗蚀剂光栅增加,测量得出当光致抗蚀剂光栅的衍射效率为 17.3% 时,选择蚀速比,提高调制度,光刻光栅的衍射效率达 30.2%,后者较前者提高 70%。这种利用蚀刻提高光刻全息图的调制度,从而提高其衍射效率的方法对于制作高衍射效率的 HOE 和模压全息模板有重要意义[5]。

(3) 等离子体蚀刻与湿法腐蚀相比最大的优点是可使蚀刻具有强方向性。但是由于不

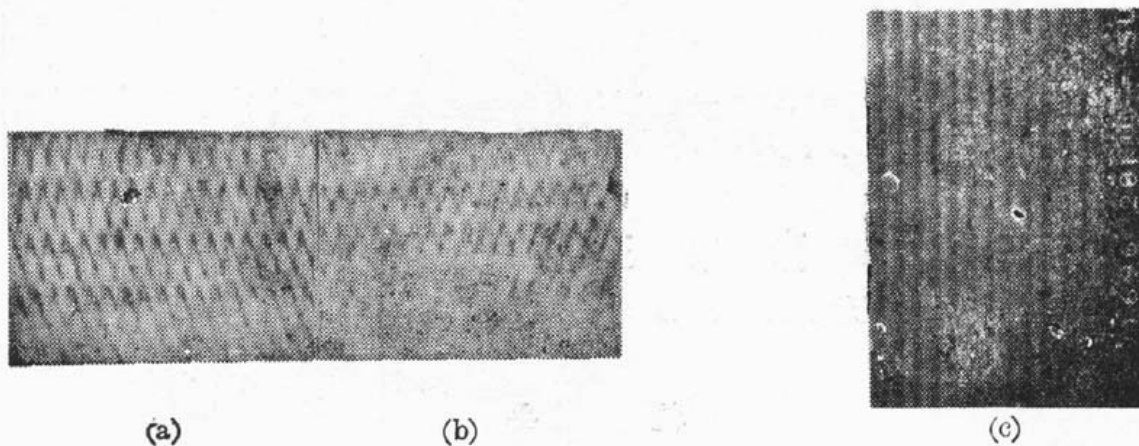


Fig. 3

- (a) Photograph of groove profile of the photoresist grating;
 (b) Photograph of groove profile of the photolithographic grating;
 (c) SEM photograph of the photolithographic grating (1500 \times)

可完全避免的“横向钻蚀”，将会使图形传递的保真度降低，并影响其空间频率的进一步提高，这方面的问题有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] G. J. Swenson *et al.*; *Opt. Eng.*, 1989, **25**, No. (Jun), 605.
 [2] L. R. Guo *et al.*; *Proc. SPIE*, 1990, Vol. 1463, 47.
 [3] S. L. Norman *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. (Apr), 818.
 [4] C. B. Zarowin *et al.*; *J. Vacuum Sic. & Technol.*, 1984, **2**, No. 4 (Aug), 1357.
 [5] Y. K- Guo *et al.*; *Proc. SPIE*, 1990, Vol. 1334, 20.

Study on etch conditions of photolithographic holograms

GUO YONGKANG, GUO LURONG AND ZHANG XIAOCHUN

(*Institute of Information Optics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

(Received 4 March 1991; revised 28 May 1991)

Abstract

We have, on combining holography with photolithography, improved the etching conditions of making binary elements and produced photolithographic holograms which can yield continuous phase modulation. This paper points out that it is most important to strictly control the ratio of etching rates, gives the curves of the etching rates in respect of the flow of etching gas in the case of constant response power. A proper working point has been found. As the applications of the curves, high-quality optical elements can be made,

Key words: photolithography, holography. Plasma-etch, HOE.