

# 激光等离子体亚微米光刻术的初步研究

郭玉彬\*

(中国科学院长春光机所 应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**提要** 描述了用高功率脉冲激光打靶产生的等离子体作为软 X 射线源而进行的接近式软 X 射线光刻研究。采用正性光刻胶 PMMA, 得到了一些新的研究结果。

**关键词** 软 X 射线, 激光等离子体, 光刻术

## 1 引言

软 X 射线光刻是制造深亚微米级集成电路的关键技术之一。高重复频率激光等离子体软 X 射线源较之同步辐射和脉冲等离子体 Pinch 源更易于进入实用。对于软 X 射线光刻术研究阶段而言, 是一种性能合适而又易于建立的实验手段。目前, 国外有许多使用高重复频率激光等离子体源蚀刻亚微米图形的报道<sup>[1,2]</sup>, 并且这种光源可以小型化, 是向实用化发展的一种重要的高强度软 X 射线光刻源。

## 2 实验装置

我们使用 2000 mJ(8 ns/10 Hz) Nd: YAG 激光器作激励源研制高重复频率激光等离子体软 X 射线源<sup>[3]</sup>, 靶面激光功率密度不低于  $1.1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ 。本实验采用接近式光刻法<sup>[4]</sup>, 软 X 射线曝光装置如图 1 所示, 在精密研磨的硅片表面上, 均匀地涂上一层软 X 射线光刻胶, 然后以一定的间隙将掩模置于感光胶面前, 用适量的软 X 射线直接曝光。当硅片与掩模分离后, 立即显影, 最后胶面上将留下复制的图样。

正性光刻胶 PMMA 受到软 X 射线辐射后, 入射光子与光刻胶作用诱发光刻胶发生交链反应, 光电子最大几率运动方向是垂直于 X 射线方向, 亦即在光刻胶平面中。显影后其受辐射面的溶性大于未曝光面的溶性。由半阴影效应和 X 射线衍射引起的光刻图形与掩模图形的尺寸变换差为:

$$\eta = \alpha(\lambda) S^{1/2} [\ln E_i - \ln E_t + \ln K(s)] \quad (1)$$

其中  $\alpha(\lambda)$  为与 X 光源辐射波长有关的参量;  $E_i$  为入射 X 射线能量密度 ( $\text{mJ/cm}^2$ );  $E_t$  为光刻胶的感光功率密度阈值 ( $\text{mJ/cm}^2$ );  $K(s)$  为与掩模和硅片胶面的间隙有关的常数。由此可见, 若光源和光刻胶一定, 把  $\lambda$  和  $E_t$  看作常数, 上式可表示为:

$$\eta = \alpha(\lambda) S^{1/2} [\ln E_i - G] \quad (2)$$

\* 现工作单位和地址: 长春邮电学院光通信工程系, 邮政编码: 130012。

收稿日期: 1995年10月4日; 收到修改稿日期: 1995年11月21日

其中  $G$  为常数。所以  $\eta$  正比于  $E_i$  的对数和  $S^{1/2}$ , 它们的取值直接影响着光刻分辨率。同样,  $\ln E_i$  取值也很重要,  $\eta$  随  $\ln E_i$  的增加而线性地增加。但  $E_i$  又不可太小, 否则曝光时间会延长。因此, 适当地控制入射的 X 射线量对于曝光结果至关重要。采用短波长的 X 光可有效地提高光刻分辨率。故通常在硅片和掩模前放置了铝滤光片, 可滤除 5 nm 以上的长波辐射, 大大减少由于较长波长的光衍射造成的图像分辨率下降。光源与硅片胶面的最佳工作距为 160 mm。曝光装置设计为真空密封结构, 配置了 JK150 真空泵机组, 使激光靶室和曝光室内真空度保持在  $2.7 \times 10^{-3}$  Pa 左右, 较高的抽速也可缓解光源的溅射作用。

### 3 实验结果

本文采用软 X 射线能量计初步研究了激光等离子体发射的软 X 射线能量。该能量计是在 PT-1 型激光能量计基础上设计加工而成<sup>[5]</sup>。我们的测量工作在所设计的 X 光曝光装置中进行。将 X 射线能量计安装在辐照面的位置, 加装铝滤光片的能量计可测得激光等离子体单脉冲发射(0.4~5 nm 光谱范围)的 X 射线总能量为:

$$W = 4 \left[ \frac{D}{r} \right]^2 \frac{FR_e}{K(1-\xi)} \quad (3)$$

其中,  $R_e$  是加滤光片后能量计的读数格值;  $D$  是光源亮点到光阑的距离;  $r$  是光阑半径;  $F$  是能量计灵敏度的刻度因子, 采用电定标法测得  $F = 0.325$  mJ/格值;  $\xi$  是钽吸收体的辐射损失因子。计算表明  $\xi < 0.002$ , 故可忽略;  $K$  是光源的 X 射线谱和滤光片透过率的加权平均因子, 即

$$K = \frac{\int I(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

其中,  $I(\lambda)$  为 X 射线波长为  $\lambda$  时的辐射强度, 铝滤光片透过率为  $T(\lambda)$ 。

用 2000 mJ/pulse, 1.06  $\mu\text{m}$  激光束轰击原子序数不同的几种靶材。在相同的激光打靶条件下, 我们分别测量了 Al, Cu, Pb 靶的 X 射线发射量(加铝滤光片后的测量值), 如表 1 所示。表中所采集的数据是 25 次测试结果的平均值。研究表明, 随着靶材原子序数  $Z$  的增大, X 射线发射量增加<sup>[6]</sup>。可见选用高原子序数靶材是提高 X 射线量的一条有效技术途径。

**Table 1 Emitting X-ray energy for different targets**

Materials of targets	<sup>13</sup> Al	<sup>29</sup> Cu	<sup>82</sup> Pb
mJ/Sr	0.48	0.83	1.1

以每一特定的靶材为统计单位, 综合测定 X 射线光刻胶的相对感光灵敏度。若光刻胶有效感光范围为  $\lambda_1 \sim \lambda_2$ , 滤光片透过率为  $T(\lambda)$ , 则半径为  $R$  的辐照面上接收到的靶材的 X 光发射强度为:

$$E' = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\pi R^2} \quad (\text{mJ/cm}^2) \quad (5)$$

其中  $I_0(\lambda)$  为辐照面上接收到单色波长  $\lambda$  的 X 线总辐射量。但实际上在某一波段内, 相同光谱辐射强度对光刻胶能够产生的辐射效应是不相同的。这样当光刻胶的感光灵敏度不同或靶材

发射的连续谱的光谱强度分布不同时,即使不同靶材发射相同的辐射强度  $E'$ ,所产生的辐射效应可能是不同的。设光刻胶的相对感光灵敏度为  $D_{0.5}(\lambda)$ ,将硅片表面上的辐照度用下式表示:

$$E = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) T(\lambda) D_{0.5}(\lambda) d\lambda}{\pi R^2} \quad (\text{mJ/cm}^2) \quad (6)$$

辐照度  $E$  能够准确反映硅片胶面上的辐射产生化学反应的强弱。

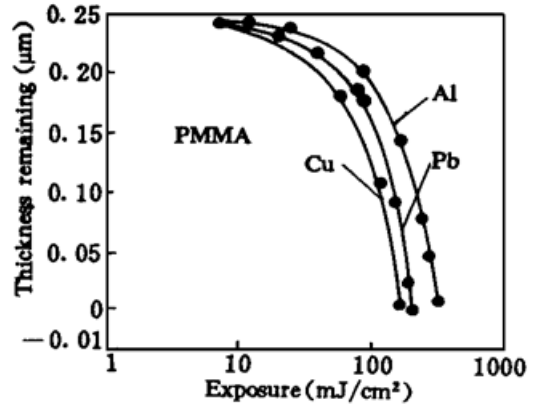
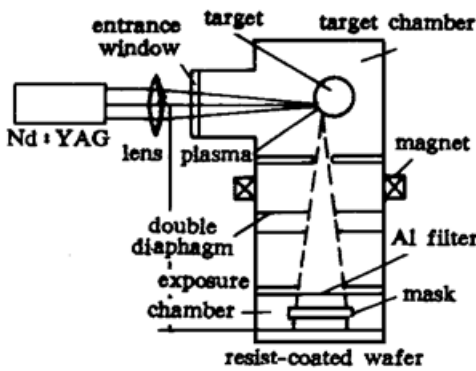


Fig. 1 A soft X-ray proximity printing device Fig. 2 Exposure sensitivity curve of PMMA resist

为此,我们采用留膜率法<sup>[7]</sup>测定了正胶 XHR-EP-1(PMMA)的相对感光灵敏度。具体冲洗条件是在 150 °C 下预烘 60 min,曝光后的光刻胶一般在 MIBK 和 IPA 的混合液中显影,比例一般为 2: 1,显影时间为 0.5~ 5 min,然后在甲醇溶液中进行清洗。在相同的实验条件下,选用 Al, Cu, Pb 靶在 2000 mJ/pulse, 1.06 μm 激光激发下发射的 X 射线进行曝光。定义 PMMA 胶对三种靶材的相对感光灵敏度分别为  $D_{0.5}(\text{Al})$ ,  $D_{0.5}(\text{Cu})$  和  $D_{0.5}(\text{Pb})$ ,结合 X 射线能量计的测量结果,得到不同曝光量和留膜率的特性曲线,见图 2。由曲线中留膜率为零时所需的最小曝光量可以得到光刻胶对每种靶材的相对感光灵敏度,如表 2 所示。光刻胶的反差值  $\gamma$  是反映感光特性、图形边缘状况和分辨本领的一个重要参数。对于正胶,其反差值  $\gamma$  通常可直接从光刻胶的感光特性曲线中测量确定,定义为:

$$\gamma = E_{\max} / E_{\min} \quad (7)$$

其中,  $E_{\max}$  为曝光显影后得到的最佳分辨图像和最高留膜率时所需的曝光量;  $E_{\min}$  为逆向延长感光曲线直线部分与留膜率  $K_0 = 100\%$  直线交点的曝光能量。由图 2 可得到 PMMA 胶对三种不同靶材的反差值见表 2。可见,PMMA 胶对三种靶材 X 光曝光灵敏度顺序为:  $D_{0.5}(\text{Cu}) > D_{0.5}(\text{Pb}) > D_{0.5}(\text{Al})$ , 且  $D_{0.5}(\text{Cu})$  与  $D_{0.5}(\text{Pb})$  值相近,而  $\gamma(\text{Pb}) > \gamma(\text{Al}) > \gamma(\text{Cu})$ , 结合表 1 可知,三种靶材的 X 射线发射量顺序为  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Al}$ 。经综合平衡两方面因素,可知 Pb 靶与 PMMA 光刻胶的最佳组合将有利于缩短曝光时间,提高光刻胶的曝光效率。实验中发现,正性光刻胶的相对感光灵敏度与胶膜厚度、显影液浓度和显影时间都有着密切的关系。减小膜厚,增加显影时间,都使灵敏度明显提高。而若降低显影液浓度,则灵敏度有所下降。因此,在测定正性光刻胶感光特性时,必须严格正确地掌握测试条件。

**Table 2 Sensitivity and contrast of PMMA resist for different targets**

	Al	Cu	Pb
$D_{0.5}$	320 mJ/cm <sup>2</sup>	180 mJ/cm <sup>2</sup>	206 mJ/cm <sup>2</sup>
$\gamma$	3.1	2.7	3.3

实验发现,对于正胶 PMMA,延长曝光时间,可导致部分曝光使留膜率降低,使光刻图形的反差降低。此外,X射线剂量过大时会使光刻图形尺寸与掩模样型的尺寸偏差增大,无光刻胶膜区域有增大趋势。这种图像复制误差产生的主要原因是由于掩模样型光衍射效应所致<sup>[8]</sup>。因此最佳的曝光剂量的选择与掩模吸收体图形厚度、光刻胶的具体特征参量及相关工艺条件都有着直接的关系。图3(a)、(b)分别是以2000×拍摄的10线/mm、20线/mm自支撑铜网的PMMA胶光刻图形照片。保证相同曝光条件和冲洗条件,我们采用汞灯发射的紫外谱线曝光,结果如图4(a)、(b)所示。与图3比较可知,紫外光刻对实验条件的宽容度较低,对掩模和光刻胶的亚微米沾污高度敏感。且有机尘埃及半阴影效应会导致光刻图形的线条模糊,而X射线曝光在这方面的问题实际上已大大减轻。

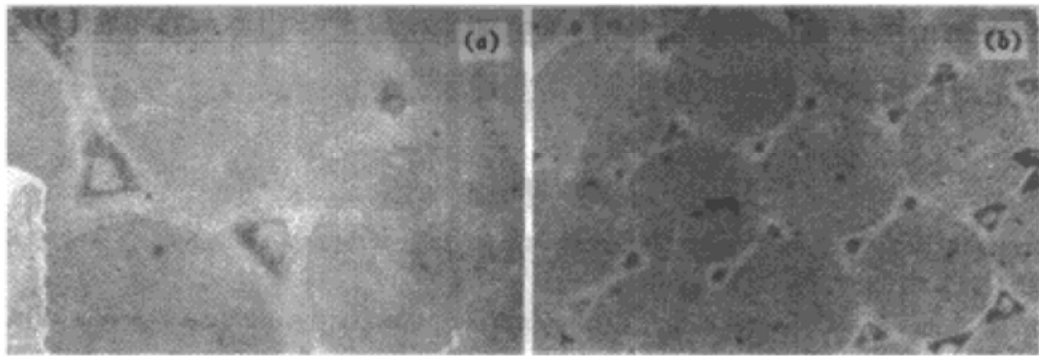


Fig. 3 Photomicrographs of a developed PMMA photoresist exposed through Cu nets using soft X-ray lithography  
(a) 10 lines/mm; (b) 20 lines/mm

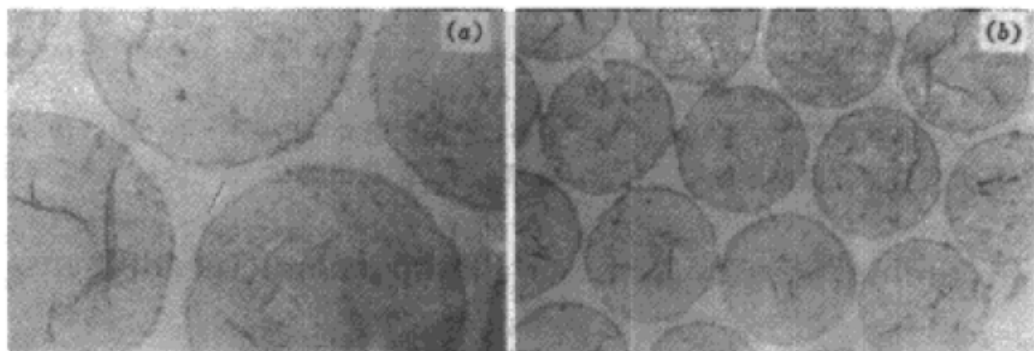


Fig. 4 Photomicrographs of a developed PMMA photoresist exposed through Cu nets using UV lithography.  
(a) 10 lines/mm; (b) 20 lines/mm

使用Pb靶发射X射线,曝光时间持续约15 min(激光器以10 Hz重复频率发射),得到了对应于透射光栅掩模的高反差光刻图形。为便于观测掩模与对应的光刻图形的比对,我们在掩模上覆盖一个直径为 $\phi 10 \mu\text{m}$ 的针孔板,以起到限定曝光区域的作用。图5(a)、(b)分别是掩模和对应光刻图形的1000×显微照片。其8750×的SEM显微照片如图6所示。由于光栅等间距刻线宽度小于 $0.8 \mu\text{m}$ ,其间的金栅线宽在 $0.4 \mu\text{m}$ 以下,以此作标尺衡量光刻图形的内部细

节,由比较结果可知,本实验曝光得到的最小刻线宽度即光刻分辨率优于  $0.4\ \mu\text{m}$ 。

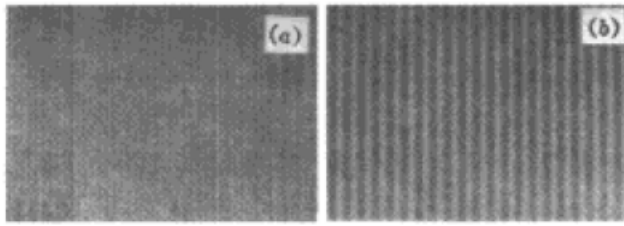


Fig. 5 Photomicrographs of a grating mask and a corresponding replica in photoresist (magnification 1000). (a) mask; (b) replica

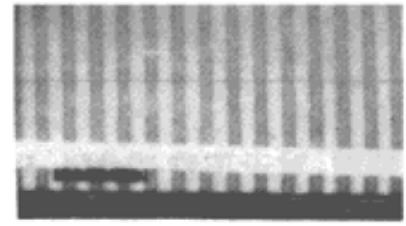


Fig. 6 SEM image of Au grating lines replicated into PMMA resist (magnification 8750)

研究表明,高重复频率激光等离子体软 X 射线光刻适用于亚微米图形的超精细加工,是光学波段光刻技术达到极限后的最易于实现的深亚微米光刻技术,而国产新型软 X 射线光刻胶在曝光性能上基本适合亚微米光刻的需要。

**致谢** 刘颖、李福田同志参加了本文工作,化工部无锡化工院和合肥科大的傅绍军同志分别提供了 PMMA 光刻胶和软 X 射线透射光栅,在此深表谢意。

### 参 考 文 献

- 1 A. L. Hoffman. High brightness laser plasma source for high throughput sub-micron X-ray lithography. *Proc. SPIE*, 1985, **537**: 198~ 205
- 2 B. Yaakobi, H. Kim, J. M. Soures *et al.*. Submicro X-ray lithography using laser-produced plasma as a source. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(7): 686~ 688
- 3 郭玉彬, 李福田. 小型激光等离子体软 X 射线辐射特性研究. *中国激光*, 1995, **A22**(7): 532~ 536
- 4 吉原秀雄. X 线リソグラフィ. *O Plus E*, 1990, (2): 104~ 110
- 5 林康春, 林尊琪, 张洪林 等. 激光等离子体实验中测量离子和 X 射线的能量计. *光学学报*, 1985, **5**(1): 32~ 36
- 6 H. G. Ahlstrom, H. N. Kornblum, R. L. Kouffman. Measurement of 0.1~ 3 keV X-ray from laser plasmas. *Laser interaction and related plasma phenomena*, 1977, **A4**(11): 437
- 7 顾振军, 孙 猛. 抗蚀剂及其微细加工技术. 上海: 上海交通大学出版社(第一版), 1989. 194~ 196
- 8 财团法人. 超大规模集成电路微细加工技术. 北京: 国防工业出版社(第一版), 1981. 114~ 135

## Preliminary Study of Laser Plasma submicron lithography

Guo Yubin

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

**Abstract** Using high-power pulsed laser-produced plasma as a soft X-ray source for proximity lithography is described in this paper. By applying positive resist PMMA, some submicron lithography experiments are carried out.

**Key words** soft X-ray, laser-produced plasma, lithography