

激光等离子体软 X 射线接近式光刻术 初步研究

郭玉彬 李福田 唐九华

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

李 加

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

摘 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。采用负性辐射线光刻胶聚氯甲基苯乙烯(PCMS), 得到了一些新的实验结果。

关键词 软 X 射线, 激光等离子体, 光刻术, 光刻胶。

1 引 言

软 X 射线光刻术以其独有的分辨率高、焦深大、工艺宽容度大、对有机尘粒缺陷不敏感、产率高、结构简单、造价低等优势, 将成为未来亚微米应用的重要光刻技术。这项技术的发展不论是作为基础科学研究的工具, 还是为提高用于计算机领域的超大规模集成电路(VLSI)和微机械零件的性能而言都十分重要。近年来, 由于软 X 射线源、掩模和光刻胶制造技术的不断突破, 软 X 射线光刻技术的发展十分迅速, 其中一些研究成果已即将从实验室阶段步入工业生产阶段, 预计 1995 年~1996 年将能生产出 64 M bit 的动态随机存取存储器(DRAM)。

用于软 X 射线光刻术的光源有同步辐射源、软 X 射线箍缩(Pinch)源和激光等离子体源。由于软 X 射线箍缩源光点尺寸大, 能量损失严重, 在软 X 射线光刻中应用已不适合。同步辐射仍是迄今为止最强大的软 X 射线源, 使用其作源的 X 射线光刻已制作出分辨率优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的重版图样^[1]。但这种辐射源结构庞大、价格昂贵, 使用及维护不便。与前二者比较, 激光等离子体由于具有亮度高、曝光时间短、重复性好、峰值辐射在软 X 射线区而对光刻有害的硬 X 射线含量少、光点尺寸小且稳定, 与源和样品距离相比可以认为它是一个理想的点光源等特点, 对于软 X 射线光刻术研究阶段而言, 无疑是最佳的选择。目前国外已有许多使用激光等离子体光源刻蚀亚微米图形的报道^[2,3]。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 射线辐射源。

为此,作者研制了小型激光等离子体软 X 射线曝光装置。使用国产的负性辐射线光刻胶 PCMS,进行了接近式软 X 射线光刻术的初步研究,得到了一些新的实验结果。

2 实验原理

本实验所采用的接近式软 X 射线光刻术是软 X 射线光刻技术中的一个重要分支^[4,5],由于它较之投影式光刻术结构简单、使用方便,与传统的接触式光刻术相比,既保留了分辨率高的优点,同时又克服了易损伤掩模、成品率低的缺陷,因而目前正作为一种较具实用性的光刻方法在国际上广泛使用。其光刻原理如图 1 所示。一个有效半径为 r 的软 X 射线点源位于距软 X 射线掩模为 D 处,掩模与涂有光刻胶的硅片之间的距离为 S ,点光源发散至光刻胶图形边缘处,形成一个半阴影模糊区:

$$\delta = (S + \Delta S)2r/D \quad (1)$$

由于软 X 射线的发散和掩模与硅片间有有限的距离,导致投影到光刻胶上的掩模图像产生边缘放大倍率误差,其横向畸变值为 b 。

$$b = S(R + r)/D \quad (2)$$

$$\Delta b = \Delta S(R + r)/D \quad (3)$$

其中 Δb 是间隙改变 ΔS 时图形位置离开掩模上对应位置的偏离量; R 为曝光场半径。可见 ΔS 会导致误差的产生,在硅片中心误差 b 为零,但沿着硅片横心向外线性地增加,从本质上讲,此误差可以在掩模制造过程中加以补偿。并且若每次曝光时能保持 S 不变,则 b 是个定值,不影响分辨率,而重复曝光时由于掩模与硅片间隔的变化使 S 不可能完全不变。因此,每次曝光前均必须进行间隔距离调整。

通过上述分析可知,最终影响图像分辨率的主要原因首先是光刻胶本身的分辨率,而对光刻分辨率的几何限制因素是半阴影 δ 和图像畸变值 Δb , δ 和 Δb 的产生会使图像模糊,降低其分辨率。减小半阴影的办法是减小 r 、 S 值,如通过精确聚焦来减低 r 值,扩大 D 值。但 r 和 S 的减小是有限度的,只有扩大曝光距离 D ,因曝光时间与 D^2 成正比,故 D 太大会大大延长曝光时间,这就需要高强度的软 X 射线源和高灵敏度的光刻胶。

除几何效应限制光刻分辨率外,影响分辨率的物理因素主要是掩模图形边缘的非涅尔衍射和快速二次电子作用等。由菲涅尔衍射产生的掩模线条误差为:

$$d_1 = K_1 \sqrt{\lambda S/2} \quad (4)$$

其中 λ 为软 X 射线波长,系数 K_1 由曝光实验定出为 1.5。(4)式表明采用短波长的软 X 光可有效提高光刻分辨率。

在曝光过程中,通过掩模的软 X 射线通量的大小和谱分布直接决定光刻图形的反差和曝光效率。根据掩模和光刻胶材料的吸收特性,在 0.4~5 nm 光谱范围内进行接近式曝光时,可使光刻图形的分辨率和反差为最佳。

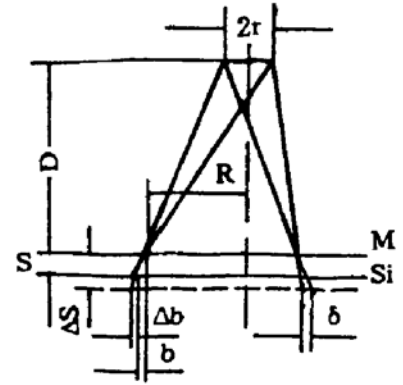


Fig. 1 Schematic diagram of soft X-ray approach lithography

设入射到掩模上的软 X 射线通量为 P_0 , 则透过掩模到达硅片胶面某一深度 z 点的软 X 射线通量可表示为:

$$P_R(z) = P_0 T_s \exp(-\rho \mu_m z) \quad (5)$$

$$T_s = \exp(-\rho_s \mu_s t_s) \quad (6)$$

其中 μ_m 、 ρ 分别为光刻胶的质量吸收系数和密度; μ_s 、 ρ_s 分别为掩模衬基的质量吸收系数和密度; T_s 为掩模衬基的透过率; t_s 为衬基厚度。对辐射线光刻胶来说, 软 X 射线吸收一般小于 5%, 即满足

$$\rho \mu_m z \ll 1 \quad (7)$$

$$\exp(-\rho \mu_m z) \approx 1 - \rho \mu_m z \quad (8)$$

故, 由此得到光刻胶中每单位深度的能量沉积速率为:

$$-dP_R/dZ = P_0 T_s \rho \mu_m = P_0 \varepsilon(h\nu) \quad (9)$$

$$\varepsilon(h\nu) \equiv \rho \mu_m T_s = \rho \mu_m \exp(-\rho_s \mu_s t_s) \quad (10)$$

其中 ε 表示光刻胶中每单位深度软 X 射线量的吸收率, 而在吸收边之间光刻胶的软 X 射线吸收近似于与波长的三次方成比例。若光刻胶完全曝光的能量为 E_R , 则曝光时间为:

$$T_{\text{exp}} = E_R / (P_0 T_s \rho \mu_m) \quad (11)$$

3 实验装置及方法

接近式软 X 射线曝光装置如图 2 所示, 主要由激光等离子体软 X 射线源和曝光室组成。

通常高功率激光脉冲聚焦到固体靶面后, 在短时间内靶吸收光能从表面开始逐步深入地被离化, 离化的离子、电子参加正在进行的激光与靶的相互作用而生成等离子体, 随即发射大量的韧致辐射和复合辐射并转变为高温热辐射软 X 射线源^[6]。激光等离子体源的技术参数如下: 所用激励源为调 Q 的 Nd:YAG 激光器, 单脉冲能量为 800 mJ, 脉冲宽度 8 ns, 激光束发散角为 0.58 mrad, 脉冲重复频率 10 Hz。采用焦距 $f=100$ mm 非球面透镜使输出的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光束经靶室的绝热玻璃窗聚焦到靶面上。

在选靶材时, 首先应保证其有较好的耐熔性, 另外, 选用高原子序数 Z 的材料, 可使原子产生高次电离, 有利于产生高强度的软 X 射线辐射, 并提高其转换效率。为此, 选择了 $\phi 19 \times 25$ mm 圆柱体 W、Cu、Fe 靶作为本实验的靶材。

当激光脉冲聚焦打靶时, 材料表面由于损伤而凹陷, 且随着打靶次数的增加, 靶的凹陷程度随之加剧, 阻碍了等离子体的膨胀及对激光能量的进一步吸收, 同时也会使靶面聚焦光斑与原靶面偏离, 从而影响到激光等离子体源的光谱特性和稳定性等。因此, 激光打靶到一定次数后, 应更换靶面, 且新靶面原则上应是旧靶面的再现, 以实现激光的重复打靶。设计了一种偏心的高精度旋转靶室系统, 其靶的旋转精度优于 $40 \mu\text{m}$ 。利用一台步进电机通过齿

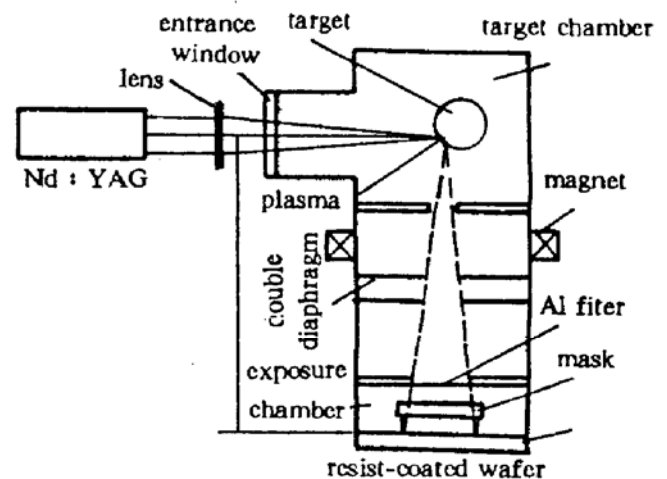


Fig. 2 The experimental setup

轮的啮合传动完成靶的旋转和提升。即当激光器工作时,步进电机驱动靶绕其轴均匀旋转,同时沿轴向移动,可编程控制器对步进电机的步长,步频作实时控制,使之易于达到实时更换新靶面的目的。

考虑到光源应具有均匀的光谱辐射角分布特性,如图 3 所示,将靶的轴心设计为偏离入射激光的光轴,使产生等离子体的激光脉冲聚焦到靶表面法线 L 和与 L 成 45° 角的 L'' 之间的 $1/8$ 圆周范围内。由于软 X 射线辐射强度和来自靶点的溅射物都随着 $L \rightarrow L''$ 的增大而增加,为了得到较强的软 X 射线输出,并使溅射物控制在允许的极限之内,经综合平衡,选定与 L 成 27° 角的 L' 为靶焦点位置,在此位置因靶焦点形状的展宽而造成的脉冲平均功率的下降几乎可忽略。此外,为便于实现激光束的最佳聚焦,尽量缩短靶室中心到窗口的距离,将聚焦镜置于靶室外;同时,在旋转靶轴和靶室的上盖间加一轴密封圈,以解决旋转靶和靶室之间由大气到真空的过渡问题。

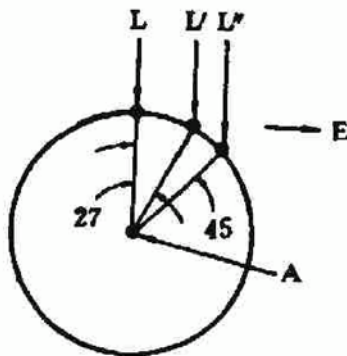


Fig. 3 Schematic diagram of laser focal spot positions on the target surface. The target cylinder rotates about axis A, which is perpendicular to incident laser rays (L, L', L'') and to the plasma light exiting from the source to the experimental chamber in direction E

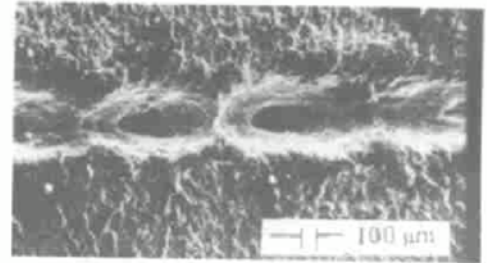


Fig. 4 Scanning electron micrographs of craters in Cu target produced at 10 Hz main repetition rates

靶材表面产生的凹陷坑的尺寸通常可作为评估脉冲激光能量稳定与否和聚焦效果优劣的综合指标^[7]。在扫描电镜下观察靶坑尺寸约 $200 \mu\text{m}$ (靶坑的 $200\times$ 显微照片见图 4), 这应为其最小焦点直径的上限值, 由此可知, 光源靶面功率密度不低于 $3.2 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 。

每次曝光前, 将涂胶的硅片置于掩模后 $10 \mu\text{m}$ 处, 为了保证在小间隙条件下使掩模和硅片能精密对准, 在光电显微镜下采用具有双重焦点光学系统的十字丝自动位置对准方法, 把掩模和硅片安装在机动卡盒内, 插入曝光室。

由于聚氯甲基苯乙烯胶对远紫外光有强吸收, 另外, 长时间曝光时靶点喷射的杂质粒子和铜蒸气对硅片胶面的污染也不容忽视。为此, 在硅片和掩模前放置了以聚丙烯薄膜为基底镀铝的软 X 射线滤光片^[8], 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。其中聚丙烯膜厚 $1.2 \mu\text{m}$, 蒸镀铝厚 $0.3 \mu\text{m}$ 。

在设计曝光室时, 发现硅片胶面与光源靶点间的距离对光刻实验结果影响较大。距离调近时, 溅射严重; 而过远则曝光时间延长。为进一步消除溅射的影响, 在旋转靶室和曝光室的连接法兰内增设孔径为 $\phi 10 \text{ mm}$ 的两级光阑结构, 并安装了一对钕钴合金的永久磁铁, 其直径为 $\phi 40 \text{ mm}$, 厚 20 mm , 表面磁感应强度不低于 0.2 T , 以偏转掉带电溅射粒子。综合考

虑光强和溅射两方面因素，光源与硅片胶面的最佳工作距被确定为 160 mm。连续曝光后，得到了感光适度的光刻胶图形。图 5(a)、(b)分别为以相同的曝光时间得到的调整前后铝膜滤片表面 200×显微照片，可见经调整后的铝膜滤片表面无明显的溅射痕迹。

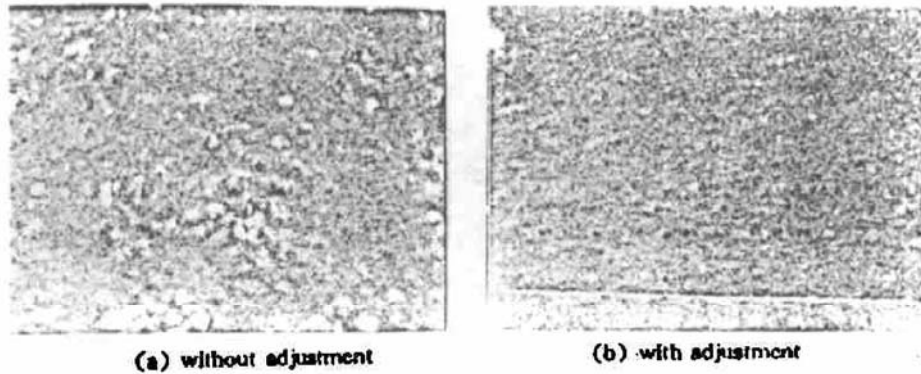


Fig. 5 Comparison of photomicrographs of Al filter surface obtained at same exposure times respectively (a) without adjustment, (b) with adjustment

为防止激光束在靶室内聚焦后空气被击穿，并确保激光等离子体的软 X 射线辐射在传输过程中的衰减降至最低限度，将曝光装置设计为真空密封结构，配备了 JK150 真空泵机组，使激光靶室和曝光室内真空度保持在 2.7×10^{-3} Pa 左右，较高的抽速也可缓解光源的溅射作用。

本实验使用了国产负性辐射线光刻胶聚氯甲基苯乙烯。这种胶在辐射线(电子束、X 射线、远紫外、离子束等)照射下，吸收辐射线能量逐出二次电子(主要是 K 层电子)而发生辐射化学反应，其结构中的 C-Cl 键分解为 Cl 素自由基引发 H 的反应而进行交联，致使其分子随着溶解度的减少而增加其重量，最终形成曝光区的不溶解图像。由于聚氯甲基苯乙烯胶是在负性辐射线光刻胶氯甲基化聚苯乙烯基础上制得的均聚合产品，其结构的均一性决定它有较之前者更优的性能：1) 容易制造和控制决定聚合物特性的分子量参数如分子量、分散度等，使其灵敏度、稳定性、耐干蚀刻性能得以提高；2) 有均匀致密的抗蚀剂液，其分辨率 $< 0.5 \mu\text{m}$ ，反差 $\gamma=1.7$ 。

经分子量分级处理后的聚氯甲基苯乙烯溶解在乙二醇乙醚醋酸酯中，配制成所需浓度，用 $0.2 \mu\text{m}$ 微孔膜过滤后待用。在涂胶台上用旋转法将胶均匀地涂敷在 $\phi 30 \text{ mm}$ 的硅片上(室温 $24 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，相对湿度 60%，聚氯甲基苯乙烯的固含量为 8%~12%)。用美国 alpha-step 200 型膜厚仪测得的膜厚与转速关系曲线如图 6 所示，该胶成膜性好，胶膜均匀。根据曲线选择适当转速使硅片涂胶厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 。在 90° 下前烘 30 分钟，曝光后放入醋酸正戊酯和乙丙醇(容积比 3:1)的混合液中显影及漂洗，显影时间一般为 30~45 s，这一过程可用光学显微镜监视进行。再在 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 下坚膜 30 分钟，最后进行常规的酸性腐蚀液腐蚀或用氧等离子体干法腐蚀。

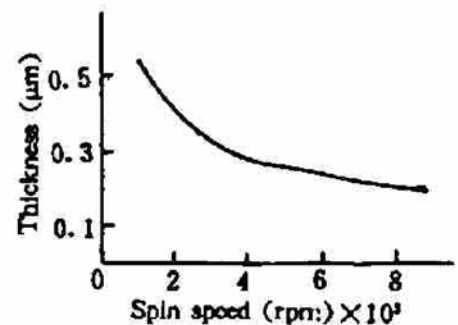


Fig. 6 Thickness versus spin speed curves for PCMS

4 实验结果及讨论

由于自支撑的标准铜网衬度很高,可作为软 X 射线接近式曝光实验中较为理想的掩模材料。为此,选用 10 l/mm、20 l/mm、50 l/mm 的标准铜网进行了大量的曝光实验,用光学显微镜和扫描电镜研究显影后胶的图形,可见其边缘整齐、分辨清楚的图像。光源工作频率为 10 Hz,曝光时间为 20~60 分钟。由于显影后光刻胶的蚀刻深度与其感光深度相对应,即对应与光刻胶有效发生交联反应所必需的辐射量,因此,首先用扫描电镜分别观测了用 W、Cu、Fe 靶在不同的曝光时间内得到的聚氯甲基苯乙烯胶的蚀刻深度,其测量结果如图 7 所示。可见 Cu 靶和 Fe 靶对光刻胶的蚀刻效率至少优于 W 靶两倍,而 Fe 靶又稍稍优于 Cu 靶,故三种靶材的曝光效率顺序为 Fe>Cu>W,这与文献[1]报道的结果是一致的。而三种靶材易溅射程度顺序为 W>Fe>Cu,因此兼顾上述二种因素,我们认为 Cu 靶是较为合适的选择。图 8 为使用 Cu 靶后用扫描电镜以 500×拍摄的 50 l/mm Cu 网的光刻显微照片(侧视 45°),可见其清晰的侧壁外型(侧壁平直度、均匀度优于 0.5 μm),其膜厚经膜厚仪测试为 0.32 μm。图 9 所示的部分照片是用反射式光学显微镜以 300×拍摄而成(俯视)。网格图案上的小污点和几

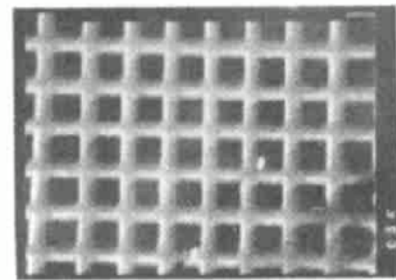
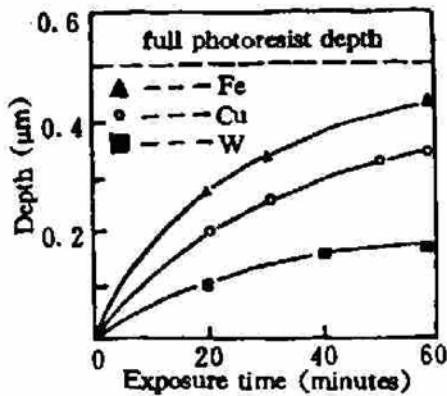


Fig. 7 Depth of photosensitized (etchable) resist as a function of exposure time to pulsed laser plasma radiation produced at a repetition rate of 10 Hz

Fig. 8 SEM photograph of a developed PCMS photoresist exposed through a 50 l/mm Cu net mask for using a Cu target (magnification 500) . Resist thickness is 0.32 μm

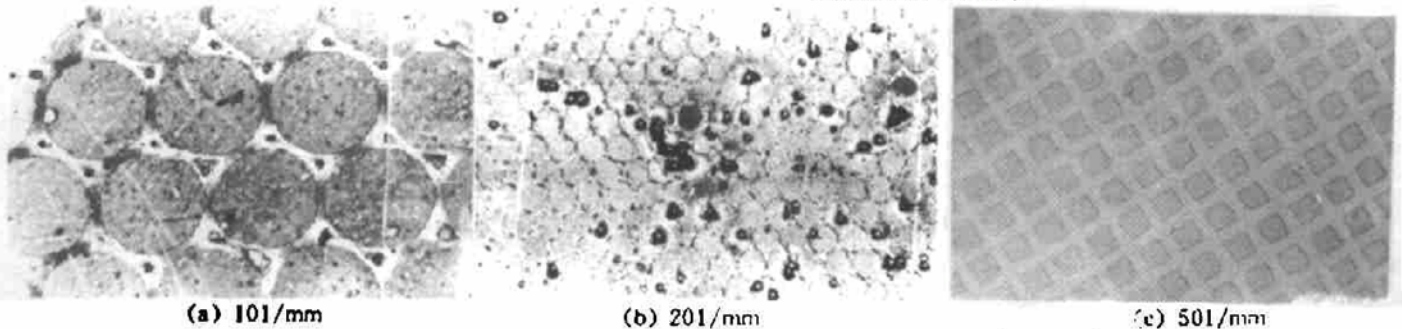


Fig. 9 Photomicrographs of a developed PCMS photoresist exposed through Cu nets

(a) 10 l/mm, (b) 20 l/mm, (c) 50 l/mm (magnification 300)

处透明缺口分别是由于显微拍摄中尘埃的沉积和铝膜滤片的针孔造成的。经 8~16 分钟过量腐蚀,样片胶面光滑、无漂胶;图形线条陡直、无钻蚀和明显侧蚀。图 10(a)、图 10(b)分别为以 1000×拍摄的 50 l/mm Cu 网掩模及对应的光刻图形照片,通过对照可知,进一步放大后显现出的图形边缘局部不平滑、毛边是由于现有掩模制造质量的问题而引起的。

由于 50 l/mm 标准 Cu 网的格间距小于 15 μm,其间的网丝线宽小于 5 μm,以此作标尺

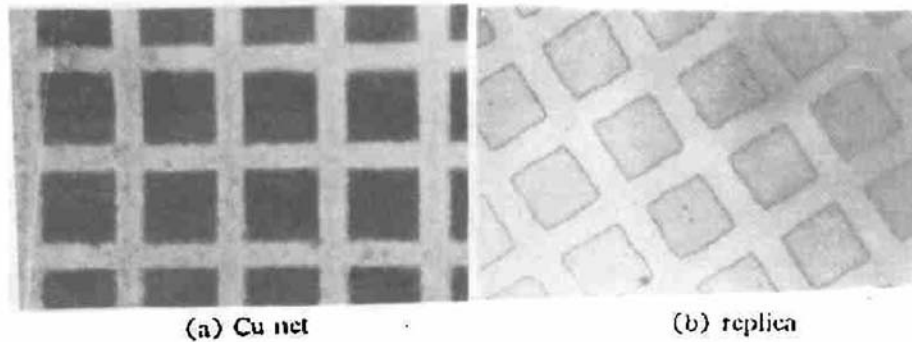


Fig. 10 Photomicrographs of a 50 l/mm Cu net mask and a Cu responding replica in photoresist. (magnification 1000) (a) Cu net, (b) replica

来衡量每个光刻图形的内部细节, 由比较结果可知, 初步曝光实验得到的最细线条宽度即光刻分辨率优于 $5 \mu\text{m}$ 。从现有实验结果分析, 为满足超大规模集成电路技术和 LIGA 工艺的需求, 要刻蚀出高分辨率和大纵宽比的微细图形, 应从提高软 X 射线源强度、光刻胶和掩模的质量等途径入手作进一步的探索。

本实验使用的负性辐射线光刻胶聚氯甲基苯乙烯由无锡化工研究设计院慎微、杜涌兴同志提供, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 陈时胜, 激光等离子体 X 射线源及其应用. 光学机械, 1991, 10(1): 54~63
- [2] Fred Bijkerk, Eric Louis, Gert E. *et al.*, Laser plasma as X-ray source for lithographic imaging. *Proc. SPIE*, 1989, 1089(8): 274~282
- [3] 董月华, レーザープラズマ X 線の特性と X 線リソグラフィへの応用. 応用物理, 1987, 56(1): 2~18
- [4] 董月华, X 線リソグラフィ. *O plus E*, 1990, 123(2): 104~110
- [5] 中野尚雄, 中 正夫, 高橋正雄, レーザープラズマ X 線源とリソグラフィへの応用. レーザー研究, 1988, 16(8): 518~526
- [6] Alan L. Hofrman, Georg F. Albrecht, Edward A. Crawford, High bright-ness laser/plasma source for high throughput submicron X-ray litho-graphy. *J. Vacuum, Sci. & Technol.*, B3(1): 256~261
- [7] David J. Nagel, Charles J. Nagels *et al.*, Repeti-tively Pulsed-plasma soft X-ray source. *Appl. Opt.*, 1984, 23(9): 1428~1433
- [8] 李懋廉, 申明阳, 邵桂英等, 软 X 光滤光片的研制. 光学学报, 1986, 6(6): 493~499

Preliminary Study of Laser Soft X-Ray Approach Lithography

Guo Yubin Li Futian Tang Jiuhua

(State Key Laboratory of Applied Optics, Academia Sinica,
Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Li Jia

(Changchun Institute of Physics, Academia Sinica, Changchun 130021)

(Received 2 March 1993; revised 21 April 1994)

Abstract Using high-power pulsed laser-produced plasma as soft X-ray source for approach lithography is described in this paper. By applying negative resist PCMS, some new experimental results are obtained.

Keywords soft X-ray, laser-produced plasma, lithography, resist