

软 X 射线接触式光刻术的初步实验

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, 长春 130022)

TN470.57

摘要 描述了用激光等离子体软 X 射线源进行软 X 线接触式光刻术的研究, 并得到了分辨率优于 $5\mu\text{m}$ 的结果。

关键词: 软 X 射线; 激光等离子体; 光刻术

1 引言

八十年代以来, 超大规模集成电路和微机械制造技术已要求光刻线宽向亚微米发展。由于采用波长较短的软 X 射线曝光几乎不存在可见和紫外光的衍射和电子束散射所造成的图形失真等缺陷, 而且其背景散射小, 可以得到深宽比大的图形; 对尘埃的透过性好, 对净化要求低, 成品率高; 与同类电子束光刻机比其设备简单、效率高等, 因此该项技术的研究在国际上空前活跃, 已成功地用于亚微米图形的复印技术^[1]。

目前用于软 X 线光刻术的射线源主要有同步辐射、脉冲等离子体 Pinch 源和激光等离子体光源等。同步辐射的光束质量好, 但这种光源造价昂贵、建造难度大, 只有极少数地点具备此条件; 而 Pinch 源的象点尺寸稍大, 颗粒污物溅射很强。激光等离子体源与之相比, 具有光源稳定性、重复性好、亮度高、曝光时间短、峰值辐射在软 X 线区, 而有害的硬 X 线和杂质粒子较少等优势。尤其是象点尺寸与光源到掩膜的距离相比, 可以认为它是接近理想的点光源。而且激光等离子体源可以小型化, 作到价格低廉、使用方便, 是一种向实用化发展的有前途的软 X 线源, 有望先进入普通实验室。

为此, 我们研制了一种小型激光等离子体软 X 线曝光装置, 进行了软 X 线接触式光刻术的实验性研究, 得到了一些较好的结果。

2 实验原理

高功率激光经聚焦后, 靶面固体在极短时间内吸收束能迅速变成等离子体, 并转变为高温热辐射 X 射线源。其辐射原理示意图如图 1 所示。当激光巨大脉冲能量向靶面灌输时, 靶材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, 随即发射含大量软 X 线的韧致辐射和复合辐射。而人们延用已久的 X 光管则是采用真空中加速电子轰击靶, 使之发射特征 X 线谱的方法。由于 X 射线发射效率极低, 输入功率绝大部分都转化为热能。与传统的 X 光管相比, 由激光等离子体产生的软 X 线辐射具有较高的光束质量及较高的软 X 线转换效率, 同时也省去了水冷散热复杂机构。

收稿日期: 1993 年 9 月 27 日

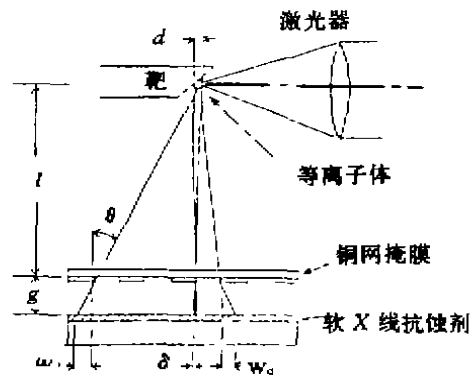


图1 光源辐射原理示意图

本实验所采用的软X射线接触式光刻术从其曝光方式上讲是光刻技术中最为简便但也是迄今唯一能接近理论分辨率极限值的方法^[2]。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。然后将掩膜紧压在感光胶面上,用适量的软X射线直接曝光。当硅片与掩膜分离后,立即显影,最后胶面上将留下辐射损伤的图样,蚀掉的光刻胶厚度与其感光深度相对应,通过光学或电子显微镜即可重现与掩膜一致的凸凹不平的微细结构。实验中所用软X

线性光刻胶 CMPS 由无锡化工院研制,具有高灵敏度、高稳定性及耐干蚀刻等特点,其分辨率优于 $0.5\mu\text{m}$ ^[3]。

影响最终^[4]像分辨率的因素主要有光刻胶自身的分辨率、光源象点的空间尺寸、X射线波长及掩膜与胶面的距离等。而衍射效应和X光感光胶分辨率可准确体现其综合效果。衍射分辨率为 $(\lambda S)^{1/2}$ ^[4],其中 λ 为所使用的X射线波长, S 为掩膜与胶面的距离。由此可见,减小 S 不失为提高光刻分辨率的最佳途径。实际上若想完全消除 S 是不可能的,但可以采取措施尽可能地降低 S 值。我们选用了软X射线透过率较高的聚丙烯有机薄膜覆在感光胶面上(膜厚约 $1\mu\text{m}$)^[5],使得掩膜与胶面紧贴,即将二者距离减小到最低限度,很好地解决了由于 S 值过大而导致光刻图像分辨率下降的问题。

3 实验装置和方法

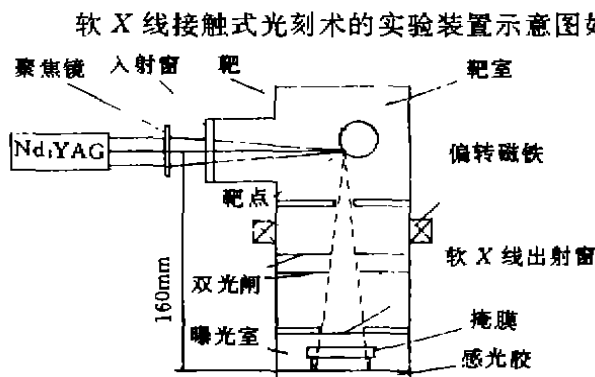


图2 实验装置示意图

软X射线接触式光刻术的实验装置示意图如图2所示。所用软X射线激发源是调Q的Nd:YAG激光器,其峰值单脉冲能量约800mJ,脉冲宽度8ns,脉冲重复频率可达10Hz,光束发散角为0.58mrad。采用焦距100mm的非球面透镜可使输出的 $1.06\mu\text{m}$ 激光束经靶室的绝热玻璃入射窗聚焦到靶面上。考虑到在软X射线区应有较高的转换效率和耐熔性,我们选择了 $\phi 19 \times 25\text{mm}$ 的圆柱体铜靶作为本实验的靶材^[6]。当激光器工作时,用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,以保证每束

激光脉冲都会打到新鲜靶面上。

脉冲激光聚焦打靶会使靶材表面灼烧出凹陷坑,其尺寸大小通常可作为评估激光束能量稳定与否和聚焦效果优劣的综合指标^[7]。在显微镜下观察该坑尺寸约 $200\mu\text{m}$,这应为其最小焦点直径的上限值。据此可知,光源靶点瞬时功率密度应不低于 $3.2 \times 10^{11} \text{W}/\text{cm}^2$ 。

由于CMPS胶对远紫外光吸收强烈,另外,长时间曝光时由靶点喷射的杂质粒子和铜蒸气对感光胶面的污染也不容忽视。为此,我们在硅片及掩膜前加入以塑料膜为基底镀铝的软X射线滤光片^[8],可消除6nm以上的长波辐射,大大减少由于较长波长的光衍射而造成的图像分

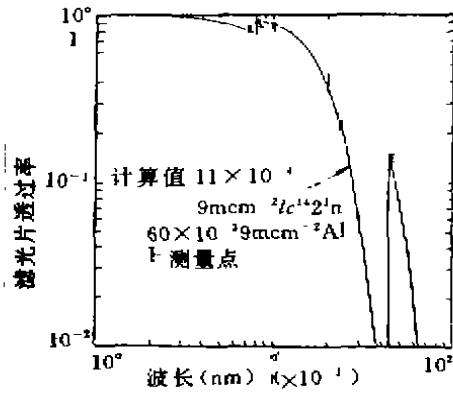
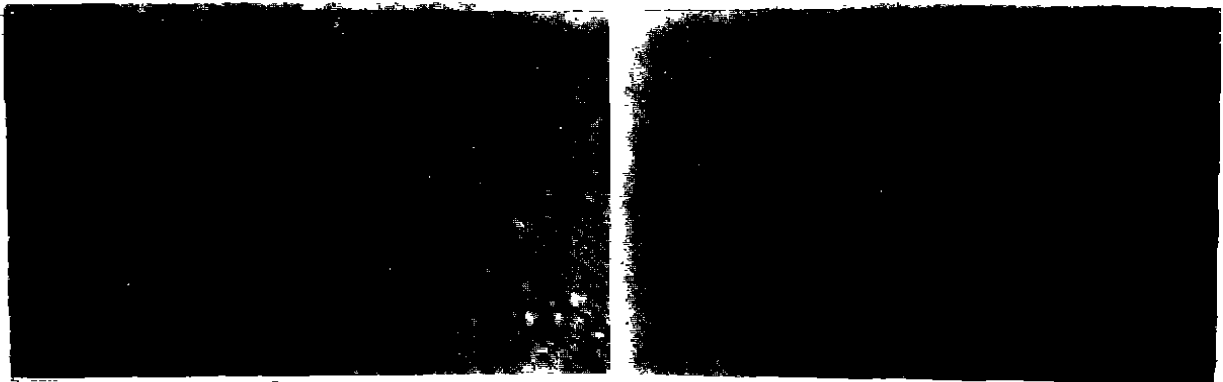


图3 软X线滤光片透过率曲线

分辨率下降。其软X线透过率曲线如图3所示。其中塑料膜厚 $1.2\mu\text{m}$ ，蒸镀铝厚 $0.3\mu\text{m}$ 。

在实验系统设计时，我们发现感光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；而过远则射线量减弱，曝光时间延长。为进一步消除溅射的影响，我们在靶室和曝光室的连接法兰内增设了孔径 $\phi 10\text{mm}$ 的二级光阑机构，并安装了一对钐钴合金的永磁体，其直径 $\phi 40\text{mm}$ ，厚 20mm ，表面磁感应强度不低于 0.2T ，以偏转掉带电溅射粒子。综合考虑光强和溅射两方面因素，经反复调整，光源与感光胶面的最佳距离被确定为 160mm 。连续曝光后，得到了感光适度的光刻图形。图4(a)、(b)分别为曝光时间相同时，调整前后铝膜滤片表面 $200\times$ 显微照片，可见调整后滤片表面无明显溅射痕迹。

为防止激光在靶室内聚焦后空气被击穿，并确保激光等离子体软X线辐射在传输过程中的衰减降至最低限度，我们将实验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 $2.7\times 10^{-3}\text{Pa}$ 左右，较高的抽速也可缓解光源的溅射作用。



(a)调整前

(b)调整后

图4 调整前后铝膜滤片表面显微照片

曝光后的CMPS胶通常在醋酸正戊酯和异丙醇的混合液中冲洗，比例为3:1，显影时间为(30~45)秒。整个过程可用光学显微镜监视进行。

4 实验结果及讨论

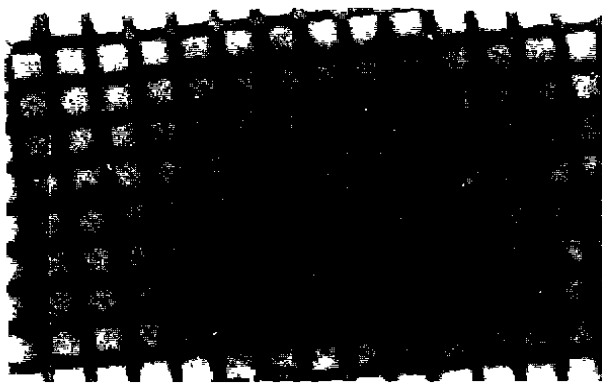
由于标准铜网衬度很高，可作为软X线光刻实验中较为理想的掩膜材料。为此，我们选用10线/毫米、20线/毫米、50线/毫米标准铜网进行了大量的曝光实验，得到了清晰的图像。图5所示的部分照片是用光学显微镜以 $200\times$ 拍摄而成。网格图案上的小污点及几处透明缺口分别是由于显微拍摄中沉积的灰尘和铝膜滤片的针孔造成的。图6(a)、(b)分别是以 $1000\times$ 拍摄的50线/毫米铜网及对应的光刻图形照片。通过对照可见，进一步放大所显示出的局部线条不



(a) 10 线/mm 圆孔铜网



(b) 10 线/mm 方孔铜网



(c) 20 线/mm 标准铜网

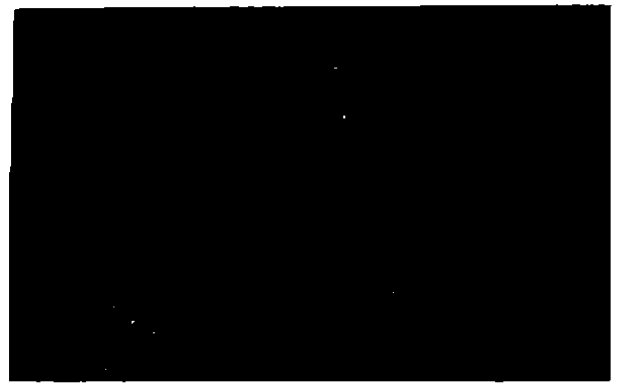


(d) 50 线/mm 标准铜网

图 5 掩膜的软 X 线光刻照片



(a) 掩膜



(b) 光刻图形

图 6 50 线/mm 的铜网及对应的光刻图形照片

直、毛边均由于现有掩膜质量不高所致。

由于 50 线/毫米标准铜网的格间距小于 $15\mu\text{m}$, 中间的网丝线宽在 $5\mu\text{m}$ 以下, 以此作标尺来衡量各个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细线条宽度即光刻分辨率优于 $5\mu\text{m}$ 。

本文工作得到高清峰、董玉芝、金轸裕、赵兴国、王晓丰同志的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. Tomie et al. Proc. SPIE, 1987, Vol. 831, 224
- [2] 青木 贞雄, O plus E, 1985, Vol. 90, No. 2, 123
- [3] 慎微等, “负性软 X 线抗蚀剂 CMPS”, 电子化工材料信息, 1991, No. 2, 4, 10
- [4] Feder R. et al. Science, 1977, No. 197, 259
- [5] 金轸裕等, “软 X 射线滤光片用超薄聚丙烯膜”, 光学机械, 1982, No. 4, 23
- [6] 陈时胜等, “激光等离子体 X 线源及其应用”, 光学机械, 1991, No. 1, 54
- [7] David J. Negel et al, Appl. Opt., Vol. 23, No. 9, 1428
- [8] 李懋廉等, “软 X 光滤光片的研制”, 光学学报, 1986, No. 6, 493

An Experiment of Soft X-ray Contact Lithography

Guo Yubin, Li Futian and Tang Jinhua

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy
of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Using a laser produced—plasma as soft X—ray source for contact lithography is described in this paper and the resolution of our experiment is better than $5\mu\text{m}$.

Key words: Soft X—ray, Laser produced—plasma, Lithography