

X 射线微光刻的常规 X 射线光源实现方法

康士秀

(中国科技大学天文与应用物理系 合肥 230026)

摘要:叙述了利用固体靶 X 射线光源实现 X 射线微光刻的方法,给出了 X 射线掩膜、抗蚀剂及 X 射线曝光的工艺流程和实验结果。

关键词:X 射线;光刻;光源

X-ray micro-lithography using solid target X-ray source

KANG Shi-xiu

(Department of Astronomy and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

Abstract: The method of X-ray micro-lithography using solid target X-ray source was introduced. Equipment and processes of resist, X-ray mask and exposure were given in detail. Results were shown.

Key words: X-ray; lithography; light source

1 引言

X 射线蚀刻是现代高技术领域超微细加工技术中最重要的手段之一,在微米和纳米量级的微电子学、集成光学和微机械元件及其集成微系统的制造中具有诱人的前景。与常规的光学光刻,包括现在最先进的 $0.13\mu\text{m}$ 技术(利用 F_2 准分子激光器的 157nm 辐射)相比, X 射线具有波长短,衍射极限影响小,从而具有更高分辨率;因低原子序数的粒子对 X 射线吸收系数小,故有很强的抗微尘污染能力,在线宽小于 $0.1\mu\text{m}$ 的亚微米/纳米尺度超微加工技术中,表现出特殊的优势。X 射线光刻的最理想光源是同步辐射,其次是等离子体 X 光源。常规固体靶 X 光源辐射功率密度低,在 X 射线光刻最佳波长范围($0.8\sim 1.5\text{nm}$)内的功率密度更低,使曝光时间过长而不适合实际生产需要。但常规 X 射线光源造价低廉,大学实验室一般都已装备,作为原理性研究和一些工艺实验,不失为

重要选择。只要采用合适的方法,完全可以进行 X 射线曝光,实现 $0.1\mu\text{m}$ 线宽的 X 射线光刻。本文介绍了最基本方法和工艺过程。

2 X 光刻原理

X 射线光刻实际上是一个利用 X 射线对图形进行精确复制的过程。其简单的原理如图 1 所示。光源是密封在真空中的,其发出的 X 射线通过真空隔离窗(一般为厚 $10\sim 50\mu\text{m}$ 的 Be 或 $2\sim 4\mu\text{m}$ 的 Si, Si_3N_4)照射到掩膜上。透过掩膜的 X 射线在抗蚀剂(光刻胶)中形成掩膜图形的潜影,即曝光。抗蚀剂的厚度一般为 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 。抗蚀剂经显影后,形成抗蚀剂图形,这样就将掩膜图形复制到了抗蚀剂上。例如为制造一个超大规模集成电路元件,通常需要 $5\sim 15$ 次或更多次曝光。当然,曝光只是所有工艺中的关键工艺之一。

图 1 中, D 为 X 射线光源直径; L 为掩膜到光源的距离; g 为掩膜到已涂覆好抗蚀剂硅

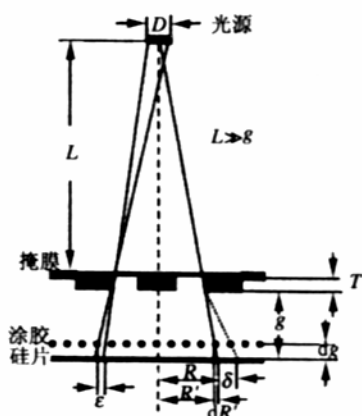


图 1 常规点光源 X 射线光刻原理图

片的距离; T 为掩膜上的图形吸收体的厚度. X 光通过掩膜后在抗蚀剂上的投影会产生半影模糊畸变 ϵ

$$\epsilon = g \frac{D}{L} \quad (1)$$

而由于掩膜和硅片之间的距离在每次对准时不可能保持不变,若这种变化为 dg ,则这个变化使得抗蚀剂上的影像产生的位置变化为 dR' ,我们称 dR' 为几何畸变,它的大小为

$$dR' = \frac{R}{L} dg \quad (2)$$

对波长为 λ 的单色光,由衍射极限所决定的分辨率为

$$\delta = b \sqrt{\lambda g / 2} \quad (3)$$

其中 b 为一常量,一般取 $b=1 \sim 1.5$; λ 为 X 射线的波长. ϵ 与光源尺寸有关,光源直径 D 越小, ϵ 越小; dR' 由对准精度决定; δ 由 X 光波长和掩膜/抗蚀剂间距决定. 显然波长越短,分辨率越高. 但是过短的波长在抗蚀剂中的吸收率会很小,曝光时间就需要加长或需要用更强的光源,这是很不经济的,也是不现实的. 另一个影响分辨率的因素是掩膜和硅片之间的距离 g , g 越小,分辨率越高. 因为掩膜很昂贵,在曝光中要多次重复使用, g 太小,势必很容易使掩膜被划伤,这应极力避免.

3 X 光源

这里介绍一种实用的可拆卸固体靶 X 射

线光源,如图 2 所示.

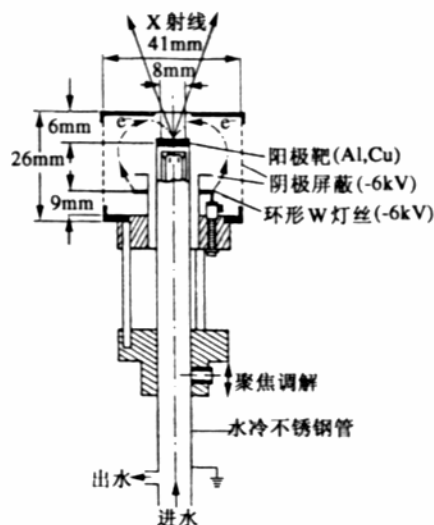


图 2 一种常规 X 光源结构简图

在高电压作用下,高速电子对阳极靶的轰击产生 X 射线,同时电子能量的大部分被靶吸收,造成靶的高温甚至熔化,为此对靶须进行水冷或油冷. 为了安全,采用负高压即阳极接地.

靶材料可选 $C(K\alpha)$, $Cu(L\alpha)$, $Al(K\alpha)$, 对应的特征波长分别为 4.47nm, 1.333nm 和 0.834nm. 特征谱线叠加在连续谱之上. 连续谱可以近似由 Kramer 定律来描述^[1]

$$I(E) = P_0 K Z^n (E_0 - E) / E_0 \quad (4)$$

式中 $I(E)$ 表示能量为 E , 能量宽度为 1eV 时所有方向辐射的积分强度,单位为 $W \cdot eV^{-1} \cdot K^{-1}$,是与靶材料有关的常量; P_0 为入射电子束的功率,单位为 W ; Z 是靶材料的原子序数; $n \approx 1$; E_0 是入射电子的能量 (keV). 图 3 所示为 Al 靶 X 光源的谱分布. 这里, $K = 7 \times 10^{-9} eV^{-1}$. 一般,特征辐射(能量为 E_c)的强度近似表示为

$$I(E) = BN(Z)F(x)(E_0 - E_c)^m \quad (5)$$

这里 B 为常量; $N(Z)$ 是原子序数的函数; $F(x)$ 是靶吸收因子,它依赖于质量吸收系数和辐射角. 当电子能量小于 15keV 时, $m=1.5$. 对电子束正入射到阳极靶的情况,电子的加速电压峰值 E_p (keV) 和靶吸收系数 α 之间的关系为

$$(\alpha/\rho) \csc \varphi = (2660/E_p)^{1.68} \quad (6)$$

式中 φ 是 X 射线辐射角; ρ 是靶材料的密度.

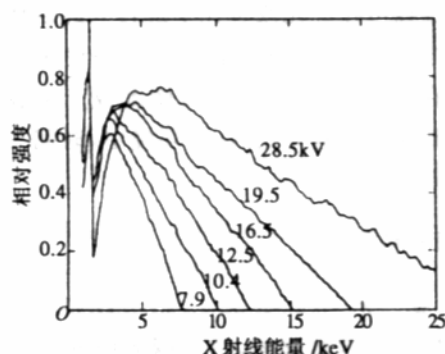


图3 Al靶光源X射线谱分布

灯丝采用两组半环状 W 丝或 LaB₆ 丝. 后者有更高的发射功率密度和更长的使用寿命, 但工艺复杂, 造价高. 阳极和阴极密封在高真空中, 真空度应优于 1.33×10^{-2} Pa. 当曝光室与光源密封在一个真空系统中时, 用扩散泵会污染掩膜和曝光系统, 所以, 真空泵一般采用分子泵或离子泵.

接通冷却水, 起动真空泵, 当真空度达到 1.33×10^{-2} Pa 时, 增加阳极电压到 10 kV, 缓慢增加灯丝电压使阳极电流达到 200 mA, X 光源即达到正常工作状态, 此时光源的功率约为 2 kW.

使用常规 X 光管的 X 光机也可以代替上述光源, 其结构和使用原理不再累述.

4 曝光室

最简单的曝光室如图 4 所示. 它是装固掩膜和涂胶硅片的部件. 通过改变垫片的厚度可调节掩膜与涂胶硅片之间的距离, 一般为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$. 曝光室固定在精密的五维可调的支架上. 曝光时调整曝光室平面使其与 X 射线入射方向垂直.

一般曝光室抽成真空或充入 $(1.33 \sim 2.66) \times 10^4$ Pa 的 He 气. 抽成真空是为了减小尘粒污染和空气对 X 射线特别是对波长大于 1 nm 的 X 射线的吸收. 利用 He 气的对流可给掩膜散热. He 气对 X 射线吸收很小, 但对掩膜的散热效果是明显的. 实际上, 曝光室甚至可以置于大

气中, 在空气下进行曝光实验. 但当空气隙超过 20 mm 时, 空气的吸收必须予以考虑.

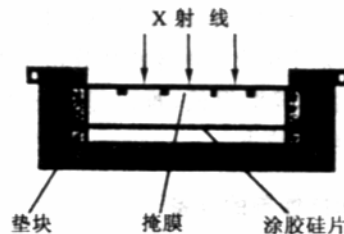


图4 曝光室

5 掩膜制备

高分辨率的掩膜一般都是利用电子束刻蚀来进行. 以 Au 吸收体和单层抗蚀剂技术为例, 其基本过程是, 在空白掩膜基膜上 ($2 \sim 4 \mu\text{m}$ 厚的 Si_3N_4 , SiC 和 BN 等), 首先利用离子溅射方法或真空蒸镀方法在基膜表面淀积约 20 nm Cr 作为吸收体与基膜之间的过渡层, 以增加吸收体与基膜间的粘结度. 然后淀积约 10 nm 厚的 Au 做为电镀基底. 最后涂覆约 $1.0 \mu\text{m}$ 厚的抗蚀剂并进行预烘. 利用电子束按设计好的图形在抗蚀剂上扫描曝光. 显影后进行电镀, 形成掩膜, 最后粘装到厚玻璃支撑环上.

由于专用电子束刻蚀装置非常昂贵, 实验室中可采取光学方法制作. 图 5 给出了一种利

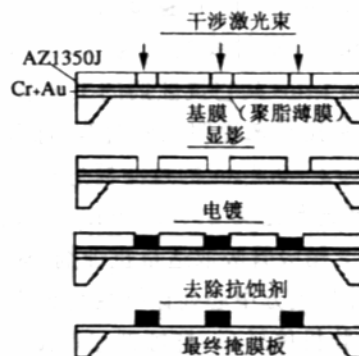


图5 掩膜制备

用单层抗蚀剂技术和激光束光刻方法制做高分辨率掩膜的例子. 利用激光束在抗蚀剂 (AZ1350J) 表面产生干涉图形来对抗蚀剂进行曝光, 显影后就得到与激光干涉图一样的抗蚀剂图形. 电镀可采用商用 Au 电镀液, 直流电镀

(上接 10 页) 温度不能过高,以避免溶剂挥发太快,造成图形流缩. 烘烤的时间以溶剂完全挥发为度. 对 PN114,烘烤温度为 110°C ,时间为 180s,强迫通风. 对 PMMA,烘烤温度为 150°C ,时间为 5min.

9 显微镜观察

利用镀膜机在抗蚀剂图形表面蒸镀约 10nm 厚的 Au,然后用高倍光学显微镜($\sim 10000\times$)或扫描电子显微镜进行观察. 扫描电子显微镜的加速电压最好小于 20keV,如果可能的话,选择 10keV 左右更合适些,因为过高的加速电压会导致高速电子对抗蚀剂图形造成永久性损伤. 图 6 所示为 PN114 抗蚀剂图形的扫描电镜照片.

10 结 论

利用常规 X 射线光源和商用抗蚀剂完全可以进行线宽达 $0.1\mu\text{m}$ 的微 X 射线光刻实验,制作高分辨率 X 射线掩膜是关键问题之一.

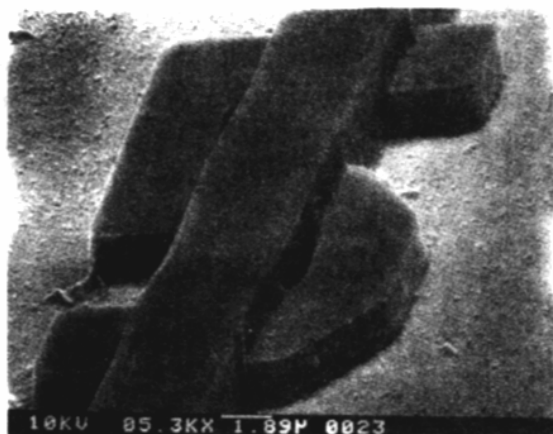


图 6 抗蚀剂(PN114)图形的扫描电镜照片

11 参考文献

- 1 Neureuther AR. Microlithography with soft X-rays. In: Winick H, Doniach S eds. Synchrotron radiation research, Chap. 7. Plenum Press, 1980
- 2 Kang Shixiu, Grilli A, Raco A. X-ray mask copying based on negative resist ray-PN. Microelectronic Engineering, 1994, 23: 231

(2000-05-29 收稿, 2000-08-06 收修改稿)