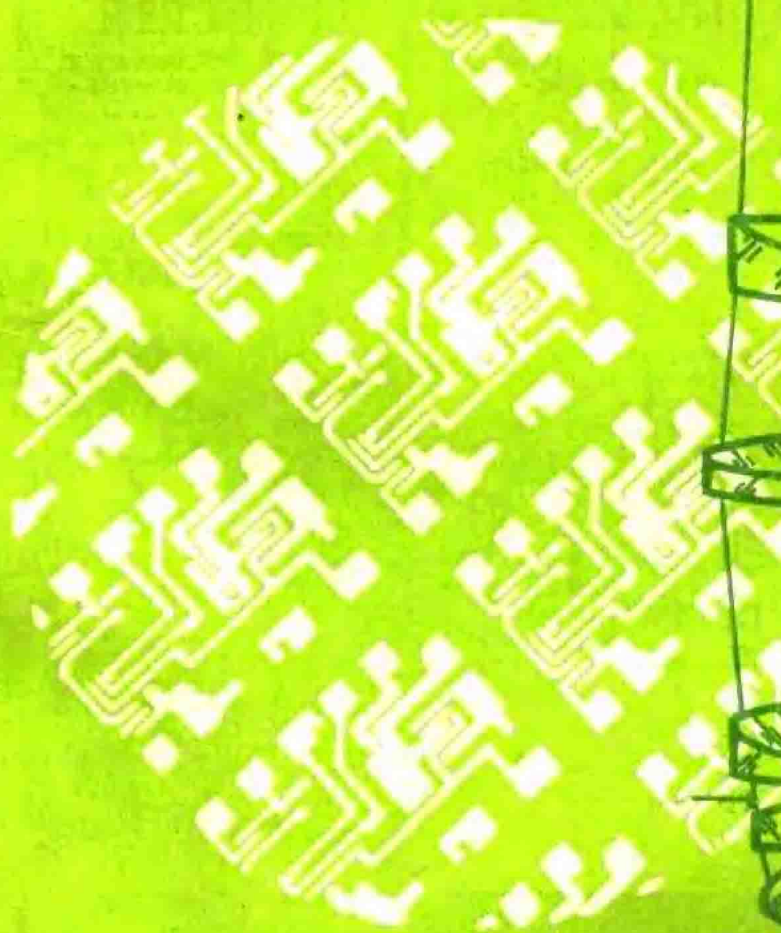


大规模集成电路制造与测试设备

译文集



上海市光学仪器工业公司
上海光学仪器研究所

序

“大规模集成电路制造和测试设备译文集”与读者见面了。兴奋之中说几句话。

实现四个现代化是我国在新的历史时期中的政治路线，因此各行各业都在努力作出贡献。从我们光学行业来说，肩负着促进四个现代化的光荣而艰巨的任务，我们更应走在前面。例如在科研、工农业生产及国防建设等各个领域经常要进行大量的科学运算、数据处理、迅速而精确的自动控制及信息传递等等，各个方面都需要电子计算机的武装。由于电子计算机技术的发展是与大规模集成电路的发展紧密相关的，而大规模集成电路的发展迫切要求光学行业提供质量好、效率高的制造和测试设备，这更说明光学行业的重要性。当今集成电路正向超大规模方向发展，电子计算机正向微小形化发展，展望未来令人惊喜。

加速发展大规模集成电路是当今科学技术的潮流。有个外国的技术权威人士来中国考察回国后，对他的政府写了一份报告，他认为发展大规模集成电路是中国四个现代化的关键问题，而大规模集成电路的制造设备和测试仪器中国还不能制造，并建议对中国禁运。十年文化大革命把我国的科学技术水平同外国先进水平本来缩小了的差距又拉大了。但是，我们有自力更生的雄心壮志，有独创的风格和虚心好学的精神，包括学习外国的先进技术，我们一定能够赶上和超过世界先进水平。本译文集的出版，就是为了向有关单位和工程技术人员提供探讨光刻技术作参考的。

我们公司承担着中央和地方科技领导部门下达的有关大规模集成电路制造和测试设备的任务，我们力求优质快速的为我国半导体工艺的研究、制造提供先进的可靠的设备和仪器，为早日实现四个现代化作出贡献。光学、电子、精密机械三者结合起来，尽快达到微米级加工和亚微米级加工要求以及将来进行微观世界的加工——即原子级加工，其前途光辉灿烂。

本译文集是一个尝试，今后还将陆续出版。在此出版之际谨向参加编辑出版的下列人员：沈建森、桂松范、陆维炳、陈明仪、祝绍箕、夏国鑫、陈国光、徐鑫培等同志一并致谢。由于时间局促，文中定有不当之处，恳请行家、读者批评指正。

上海市光学仪器工业公司经理吴伟春

1980年1月

目 录

序

$\times$ 射线光刻.....	(1)
$\times$ 射线曝光装置.....	(11)
Nikon 接近式光刻机.....	(18)
大规模集成电路中的光刻技术——紫外线曝光及电子束曝光——.....	(26)
带有定位微调装置的 $\times$ 射线曝光系统.....	(43)
电子束曝光系统的自动对准.....	(48)
掩模对准装置.....	(56)
一种新的干涉对准技术.....	(62)
用新的干涉方法对准 $\times$ 射线印刻掩模——实验结果.....	(65)
原图形发生器——机械设计.....	(68)
数显定位机械工作台.....	(76)
用各种简单相位光栅实现多重成象.....	(81)
用空间滤波法排除周期性图象上的非周期性结构.....	(94)
光掩模修整用加工技术.....	(97)
用于检查集成电路引线图形的自动光学装置.....	(102)
光学和半导体元件的表面检验.....	(114)
双焦平面显微镜.....	(118)
显微物镜的简单双焦元件.....	(123)
人物介绍——小资料.....	(10)
集成电路与光学仪器——小资料.....	(42)

X 射线 光 刻

S. NAKAYMA, T. HAYASAKA and S. YAMAZAKI

一种以 $1\mu\text{m}$ 的分辨率和 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 的对准精度为目标的实验性 x 射线曝光系统已经制成。

为使图象的几何畸变减到最小程度及缩短曝光时间的最佳系统的设计已经完成。从 x 射线的衰减和光刻胶特性的考虑出发, 最佳波长也已获得。 x 射线系统采用了这样一些新技术, 例如带硅靶的高功率 x 射线源(输入功率大于 20kw), 用具有小于 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 分辨率的基片振荡法作精密定位检测, 还采用了步进分辨能力为 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 的精密三维空间对准机构以及由 Si_3N_4 薄膜片组成的透明的 x 射线掩模。

小于 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 的复盖精度也为该系统所获得。

1. 绪 言

因为集成电路功能的复杂程度不断增加, 便产生了对能复制线宽为 $1\mu\text{m}$ 的精细图形复制工艺的迫切要求。尽管由于光特性本质上的限制, 光刻法仍被广泛应用, 而且技术上改进臻于完善。电子束刻蚀可以形成精细图形, 但是, 到目前为止在实际应用方面精细图形写入速度还不十分快。因此, 对于生产高度精细的图形结构, 使用电子束写入基片上的复制图形还是可取的。

由斯密史($\text{smith}^{(1)}$)提出的 x 射线光刻能够复制亚微米级的图形, 因为它使用了比紫外光还要短的波长($0.4\sim 5$ 毫微米)。这个方法已被许多工作者研究过^{(2)~(5)}, 并用来在实验

室里生产元件。通过这些研究证实了 x 射线光刻是很有前途的精细图形复制法, 这是由于 x 射线有高分辨率, 有对于厚的光刻胶层的适应性等等缘故。

然而, 为了改善 x 射线的实用性, 许多问题必须加以克服, 例如掩模和基片的对准, x 射线的功率及 x 射线掩模的制造。

作为把 x 射线光刻引入大规模集成电路(LSI)生产过程中去的第一步, 一种 x 射线光刻系统已经出现, 它包括全自动的精密对准装置, 大功率的 x 射线源和 x 射线掩模。通过曝光试验证实了这种系统的基本性能对于 LSI 图形的复制是十分适宜的。

2. 基本设想

2.1 系统参数的设想

在 x 射线曝光系统中, 因 x 射线束的发散及掩模与基片之间的间隙而引起的半影模糊量 δ 和偏转量 b 如图 1 所示。

在研制 x 射线系统时主要的问题之一是如

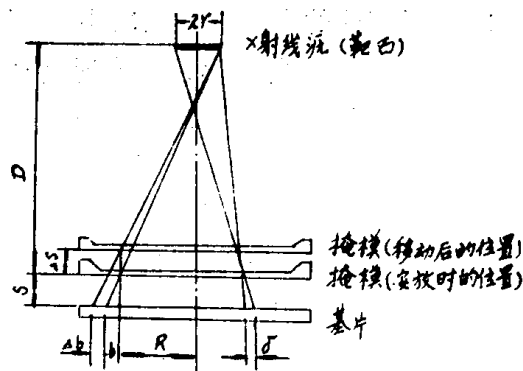


图 1 x 射线光刻中的几何关系

何减小几何图形的畸变和缩短曝光时间。由于考虑到这些问题， x 射线系统的指标就被确定下来，如表一所示。表一中系统参数的必要性在本节中进行讨论。

表一 系统的指示

项 目	指 标
曝光范围	$\phi 65\text{mm}$ (对3英寸基片而言)
曝光时间	小于1分钟(使用 $5\text{mJ}/\text{cm}^2$ 光刻胶)
最小线宽	$1\mu\text{m}$
分辨率(模糊量)	小于 $0.1\mu\text{m}$
偏转量波动极限	小于 $\pm 0.1\mu\text{m}$
掩模对准精度	小于 $\pm 0.1\mu\text{m}$

复制的分辨率与模糊量 δ 相适应， δ 由下式给出：

$$\delta = (S + \Delta S) \frac{2r}{D} \quad (1)$$

式中 S 是掩模到基片的间隙， ΔS 是间隙的变化值， D 是 x 射线源到掩模的距离， r 是 x 射线源的半径。偏转量 b 由下式给出：

$$b = S \left(\frac{R+r}{D} \right) \quad (2)$$

式中 R 是曝光场的半径。事实上必须把间隙变化值 ΔS 考虑进去。因此偏转量的变化值 Δb 由下式给出：

$$\Delta b \cong \Delta S \left(\frac{R+r}{D} \right) \quad (3)$$

从表一中可知， δ 和 Δb 两者必须控制在 $0.1\mu\text{m}$ 以内。从上述诸方程式中知道，为了使 δ 和 Δb 尽可能的小，就必须减小 x 射线源的半径，扩大 D 。与此相反，曝光时间通常与 D^2/r 成比例。因而，在系统的设计中，要获得较小的模糊量和较小的偏转量变化，就引起曝光时间的增加。对一个最佳系统设计来说，模糊量、偏转量和曝光时间之间的关系必须加以考虑。

落在基片表面的 x 射线通量 Φ 由下式给出：

$$\Phi = \frac{W \epsilon h_\gamma}{V D^2 q} [\text{J}/\text{cm}^2] \quad (4)$$

式中 W 是 x 射线靶的输入功率， ϵ 是 x 射线辐射的发射效率特性， h_γ 是 x 射线的光子能量， V 是电子加速电压。 q 是电子的电荷，另一方面到旋转靶的最大输入功率 $W_{\max}$ 由下式给出⁽⁶⁾：

$$W_{\max} = C \cdot r^{3/2} \quad (5)$$

式中 C 是与靶设计有关的常量。将方程式(5)代入方程式(4)，我们可以得出下式：

$$\Phi_{\max} = \frac{W_{\max} \epsilon h_\gamma}{V D^2 q} = C' \frac{r^{3/2}}{D^2} \quad (6)$$

使 δ 和 Δb 小于一个确定的值 E ，由方程(1)和(3)得知下列方程式一定存在：

$$\left. \begin{aligned} (S + \Delta S) \frac{2r}{D} &\leq E \\ \Delta S \left(\frac{R+r}{D} \right) &\leq E \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

因此我们可以得出下式：

$$\Phi_{\max} \leq C' \left\{ \frac{E}{2(S + \Delta S)} \right\}^2 \frac{1}{\sqrt{r}} \quad (8)$$

和

$$\Phi_{\max} \leq C' \left(\frac{E}{\Delta S} \right)^2 \frac{r^{3/2}}{(R+r)^2} \quad (9)$$

曝光时间和 $\Phi_{\max}$ 成反比例。使用方程式(7)、(8)和(9)能够获得所需要的参量 γ ， R 和 ΔS 的调整值。图2所示的是一组计算结果的例子。从这个图上可见，对应于每一个 ΔS 值有一个最佳的 x 射线源的半径 r 。为了缩短曝光时间，希望使 ΔS 值尽可能小。假如掩模到基片

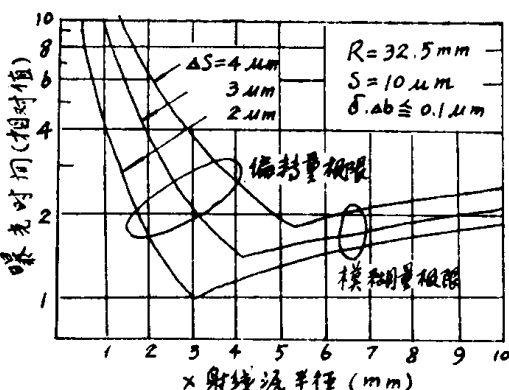


图2 曝光时间缩短到最短的最佳条件

的间隙波动值能够减小到4μm之内时,最佳的x射线源半径为3~4mm。

2.2 x射线的波长⁽⁷⁾

在x射线系统中,x射线束透过x射线窗口、掩模和周围的介质,例如氦或空气,并由于透过各种介质而有衰减。通常认为,x射线传播中的损失与波长的 $\frac{1}{3}$ 次方成正比,光刻胶的灵敏度与波长的 $\frac{1}{3}$ 次方成反比。在这节中,考虑到如何缩短曝光时间,要讨论x射线波长的选定。

如果由于窗口和掩模两者使x射线衰减,在基片表面上的x射线的辐射通量是Φ如下式⁽⁸⁾:

$$\Phi = \frac{W\Phi_0}{D^2} \exp \{ - (\mu_\omega L_\omega + \mu_m L_m) \} [J/cm^2] \tag{10}$$

式中Φ₀是x射线每单位输入功率的输出功率。μ_ω和μ_m分别为窗口和掩模的线性吸收系数,而L_ω和L_m分别为窗口和掩模的厚度。吸收界线、线性吸收系数与波长之间的关系服从下式:

$$\mu_i \approx a_i \lambda^3$$

式中λ是x射线的波长,a_i是常量。因此曝光时间t由下式给定:

$$t = F \cdot \frac{D^2}{W\Phi_0} \cdot \frac{1}{a_r \lambda^3} \{ \exp(L_\omega a_\omega \lambda^3 + L_m a_m \lambda^3) \} \tag{11}$$

式中F是光刻胶曝光所必须的剂量,a_r是光刻胶的线性吸收系数。因此,最佳波长随着传播衰减系数L而改变。 $L = \Sigma L_a = L_\omega a_\omega + L_m a_m$,如图3所示。如果传播衰减参数相当小,则选Si-K和Al-K线是有利的。例如使用2—5μm厚度的硅掩模和20μm厚度的铍窗口,就能使传播衰减参数较小。

2.3 系统设计

为了实现如表一所示的x射线光刻系统的指标,基于上述讨论,将系统的主要部件的性

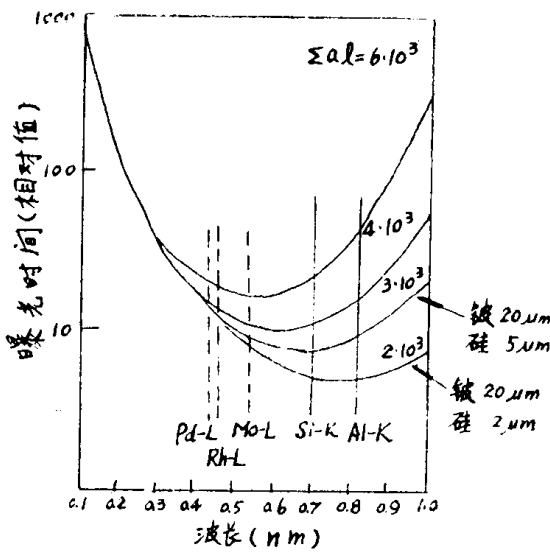


图3 最佳波长

能确定下来,如表二所示。

使用平整度高的基片时,掩模到基片的间隙容限预期可限制在2μm以内。为了达到曝光时间小于1分钟,并预想能实现灵敏度为5mJ/cm²的光刻胶,这比PMMA光刻胶灵敏度大约高100倍。在这假设之下,必须有20~25kw输入功率的x射线源。

表二 系统设计值

项 目	设 计 值
波 长	0.71nm(Si-Kα) 0.83nm(Al-Kα)
到靶的输入功率	大于20kw (25KV-1A _{max})
x射线源的半径	φ6~8mm
掩模到x射线源的距离	500~700mm
掩模到基片的间隙	10±2μm
x射线窗口	铍(20μm厚)
曝光气氛	氦气(He ²)
掩模衬底	硅(Si厚3μm)等
掩模及基片的平整度	±1μm
光刻胶的灵敏度	5mJ/cm ²

表三 主要课题

部 件	有待解决的课题
x 射线源	○ 对Si和Al靶高输入功率(大于20kw)的成就 ○ Si靶的构造 ○ 电子枪的结构 ○ x 射线窗口材料的保证
对准装置	○ 小于$0.05\mu\text{m}$分辨率的定位精度检测 ○ 具有小于$0.05\mu\text{m}$精度的精细对准机构 ○ 基片—掩模间隙控制机构 ○ 自动对准
x 射线掩模	○ 对掩模强度和生产效率的改进 ○ 透明度的改进
其他课题	○ 精密的小孔掩模制造 ○ 基片的平整度 ○ 高灵敏度的光刻胶的研制

为了研制具有表二所示性能的 x 射线系统, 一些要点已列入表三, 并且在下面将详细加以讨论。

3. x 射线源

在曝光系统的 x 射线源的设计中, 最重要的课题是涉及到如何提高输入功率的界限。使用电子束激发的 x 射线发射效率大约是 10^{-4} , 输入功率大部份转变为热。因而采用水冷旋转靶是有利的。

例如对水冷旋转靶来说, 最大的输入功率 $W_{\max}$ 可以由下式给出:

$$W_{\max} = \frac{\pi}{2} \frac{T_m}{\sqrt{\frac{2r}{AnKC} \left(1 + \frac{d}{a} \sqrt{\frac{rn}{2A}} \right)}} \quad (12)$$

$\times [\text{W}/\text{cm}^2]$

式中 T_m 是靶面最高温度, d 是靶的厚度, A 是靶的直径, n 是靶的旋转速度, r 是 x 射线源的半径, a^2 是靶的导热系数, K 是靶的热传导率及 C 是靶的热容量。对 T_m 而言, 应与靶

材料的熔化温度或再结晶温度相适应。

为了提高 $W_{\max}$, 从方程式中可知, 需要使 A 增大, d 变小, 增加 n 而且还得使用具有高 T_m 的材料。从波长方面来探讨, Si 和 Al 是有用的材料。为增加 x 射线的功率, Si 是更合适的材料, 因为 Si 的熔化点比 Al 的熔点来得高。因此水冷却的 Si 旋转靶已重新设计了, 该设计使得应用高达 20kw 的输入功率得以实现。旋转靶的技术要求和外观分别如表四及图 4 所示。

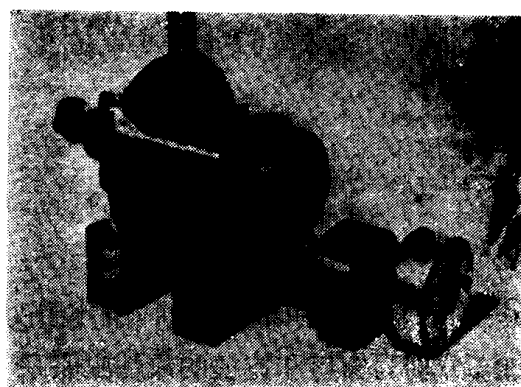


图 4 重新设计的旋转靶

靶的表面复盖了硅的薄膜, 它是用等离子体沉积法沉积在铜的薄片上的。由于采用了硅靶结构, 除了提高输入功率外, 还有耐热性得到了改善, 如图 5 所示。

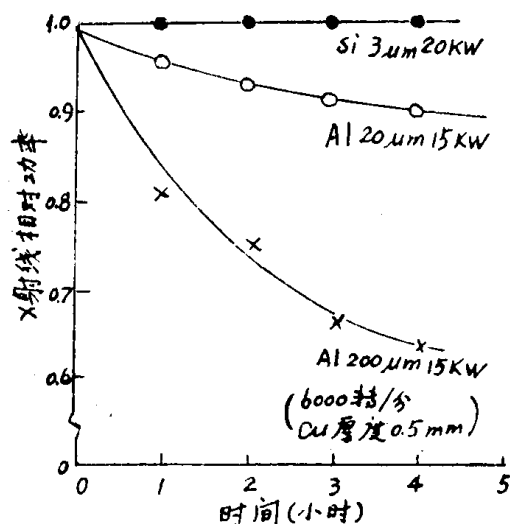


图 5 靶的厚度和 x 射线功率变化之间的关系

表 四 旋转靶的设计值

项 目		设 计 值
靶	直径(mm)	Φ95
	材 料	Si/Cu, Al/Cu
转速(转/分)		6000
冷却水流量(升/分)		20
真空 (Pa)		1.33×10^{-2} (最大输入时)
振动的幅度 (μm)		0.1 (在 6000 转/分时)
靶的重量 (kg)		小于 2kg (转子)
最大输入功率(kw)		25
正常输入功率(kw)		20

4. 定位的检测方法

要想只使用目视调节的方法来获得掩模和基片之间定位精度小于 $0.1\mu\text{m}$ 数量级是很困难的, 而且 x 射线掩模不都是完全透明的。

考虑到各种各样的局限性, 包括上面提及过的情况, 决定使用基片振荡法来检测相对位置⁽¹⁰⁾。

基片振荡法的原理如图 6 所示。通过基片的低频旋转振荡，并测定检测信号的基频和二次谐波分量之比来检测掩模与基片之间的相对位置，检测信号是由检测光束透过打在掩模和基片上的标记而得到的。

基波 (e_1) 与二次谐波分量 (e_2) 由下式给出:

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -G \Lambda W_b \frac{2W_a \xi}{\pi} \\ &\times \left\{ \frac{P}{\xi} \sqrt{1 - \left(\frac{P}{\xi} \right)^2} - \sin^{-1} \frac{P}{\xi} \right\} \\ e_2 &= G \Lambda W_b \frac{4W_a \xi}{3\pi} \left\{ 1 - \left(\frac{P}{W_a} \right)^2 \right\}^{3/2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 P 是两个标记中心的相对距离, ξ 是振荡的幅度, G 是检测器的灵敏度, Λ 是检测光束的亮度, W_0 是沿着对准方向的标记宽度, W_0

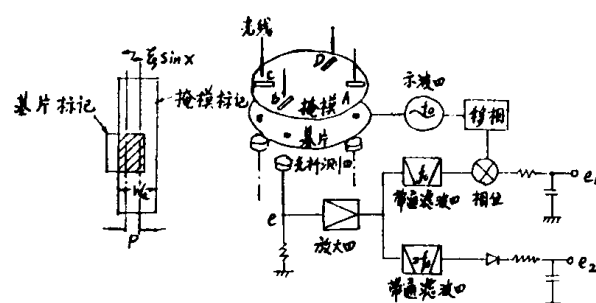


图 6 晶片振荡法的原理

是垂直于对准方向的标记长度。

图7表示了一个分辨率达到 $0.05\mu\text{m}$ 的相对位置检测的实验结果。

为了作出定位标记,使用具有 $2\mu\text{m}$ 精度刻蚀加工处理的办法,把基片打穿,从而形成基片四个位置上的矩形标记。在掩模的窗口上刻出相应的掩模标记。

基片振荡法有许多优点：分辨效率很高，光源的波动特性和光检测器不会影响最后检测性能。但是这个方法可以采用的调节范围是相当窄的，所以在精密定位之前，先要采用粗定位。然而使用常规的光学方法很容易达到几个微米的精度。

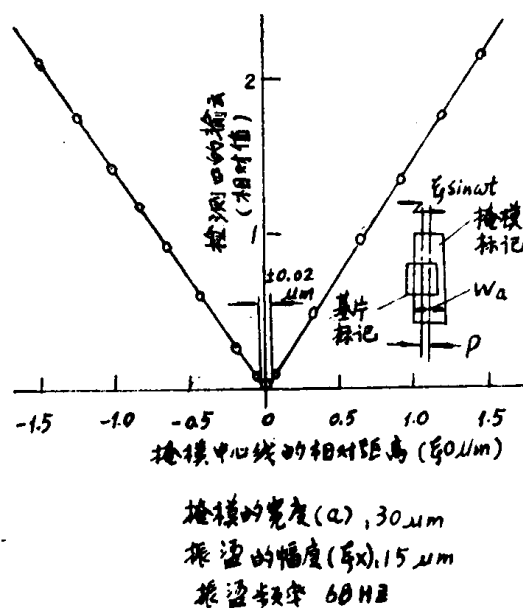


图 7 使用一维空间模型实验的相对位置结果

5. 对 准 机 构

为了达到 $0.1\mu\text{m}$ 或更高的定位精度, 这就希望提供一种直接与适当的机电传感器联接的调整机构, 在这传感器中的可动部件用弹性支承, 因此运动过程中可以做到几乎是模拟同

步、没有因空程或摩擦所引起的失效区域或饱和等特点。按照上述考虑, 一个三维空间的相对定位系统已被设计出来了。

电动型的传感器已用于 x 、 y 和 z 方向的校正上。用圆柱体的旋转来实现对旋转方向上的校正。圆柱体内沿径向安置了电致伸缩传感器(可弯曲的压电跃变元件)。图 8 所示的是沿

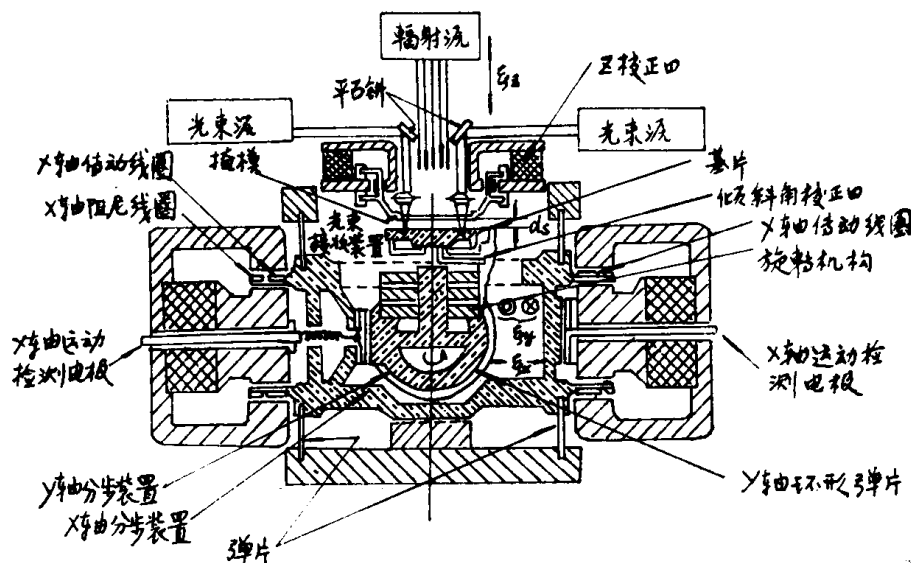


图 8 精细校正定位器的剖面视图

定位装置 x 轴线方向的剖面视图。

设计数据如表五所示。这个定位机构显示出了优良的高精度特性, 例如每一次定位分辨率在 x 、 y 和 θ 方向上大约小于 $0.05\mu\text{m}$ 。

图 9 表示了使用电动传感器每个分步的线

性响应。这表示了在工作距离范围内每一响应直线性是常量。

掩模到基片的间隙是利用静电的电容值估算的, 具有精度值小于 $1\mu\text{m}$, 而电容值是利用调制频率的方法获得。

表 五 精细校正机构的数据 (E 、 D 电动传感器, E 、 S 电致传感器)

	传动形式	每节质量 (kg)	刚 性 (达因/cm)	力的要素	最大工作距离 (μm)	最小位移量 (μm)
X	E 、 D	4.76	3.5×10^9	717N/A	± 20	0.03
Y	E 、 D	2.13	1.7×10^9	392N/A	± 20	0.04
$z(z\theta)$	E 、 D	1.20	6.9×10^8	128N/A	± 20	0.2
θ	E 、 S	0.65	2.5×10^8	$0.91^\circ/\text{A}$	$\pm 90^\circ$	0.1"

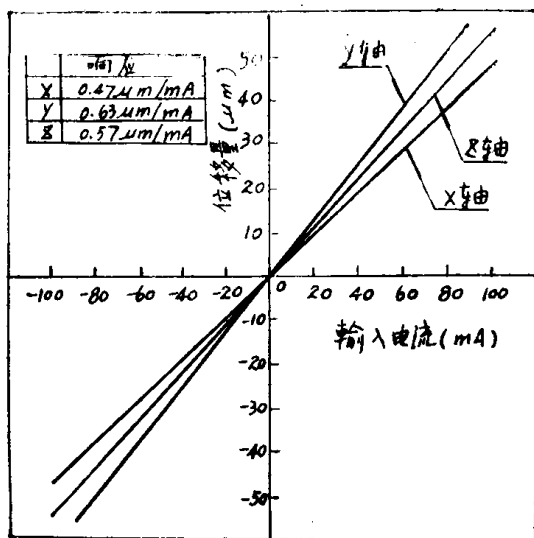


图 9 x、y 和 z 分步机械定位特性

6. X 射线掩模

关于改进 x 射线掩模方面已公开发表了许多报道, 这些掩模是高对比度和高品质, 并对 x 射线具有高透明度的相当耐用的薄膜吸附图形。高度掺杂 P^{++} -Si 层的硼通常广泛地用作为薄膜状的掩模, P^{++} -Si 层是用热扩散或者外延生长制成的。然而, 这层薄膜对可见光是不透明的, 而且强度是不那么高。这些缺陷是由于掺杂过的硼引起的。一种 Si_3N_4 薄膜掩模⁽¹¹⁾是透明的。这种透明度使元件制造中掩模容易对准。使用通常的 CVD 法(化学气相沉积法)可获得高质量的 Si_3N_4 薄膜。但在实际应用中, 薄膜的强度还不够。这就必须迫使人们用其他薄膜代替 Si_3N_4 薄膜。

图 10 所示 Si_3N_4 和 P^{++} -Si 双层结构掩模的剖面视图。 P^{++} -Si 层是由热扩散法形成的。图 11 所示薄膜的强度、透明度和 Si_3N_4 薄膜

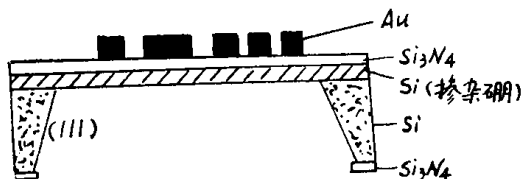


图 10 双层掩模结构

片厚度之间关系曲线。用增加 Si_3N_4 薄膜片厚度的办法略微可以提高一些强度。最重要的特点是因 P^{++} -Si 层缺陷引起了薄膜强度的稳定的降低。

要是在 P^{++} -Si 是单层的情况下, 下层强度分布大为减弱。假如把 Si_3N_4 薄膜片厚度增加到 $0.8\mu m$, 在一块足够大的并对实际曝光中稳定的基片的强度是 $1.5 \pm 0.1 kg/cm^2$ 。相反, 因 P^{++} -Si 层加厚, Si_3N_4 薄膜的强度增加三倍。掩模的光学透明度大约为 30%。

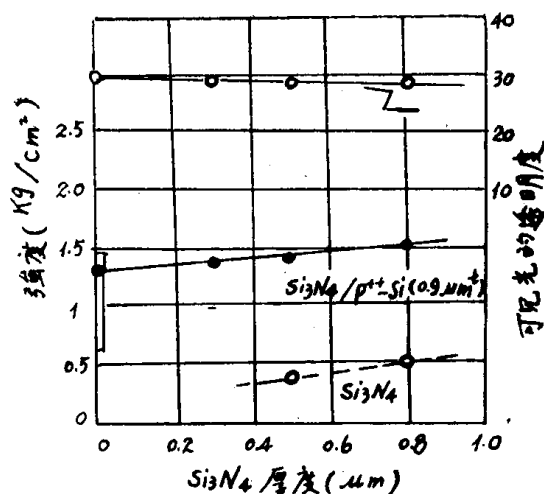


图 11 Si_3N_4 厚度、薄膜强度和透明度之间的关系曲线

图 12 所示 $Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ 多层结构薄膜掩模的横截面。这种掩模对可见光有高的透明度(高于 80%)并有足够的强度。

图 13 所示多层结构薄膜的强度。甚至于 8mm 见方的大尺寸的窗口也能制造出来, 这是因为有足够的薄膜强度的缘故。图 14 所示多层结构掩模的外观。

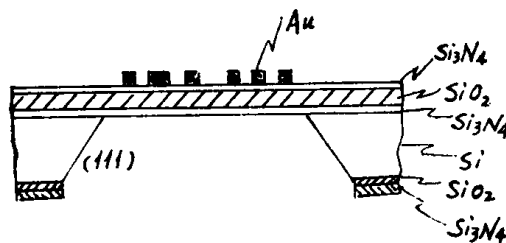


图 12 三层掩模结构

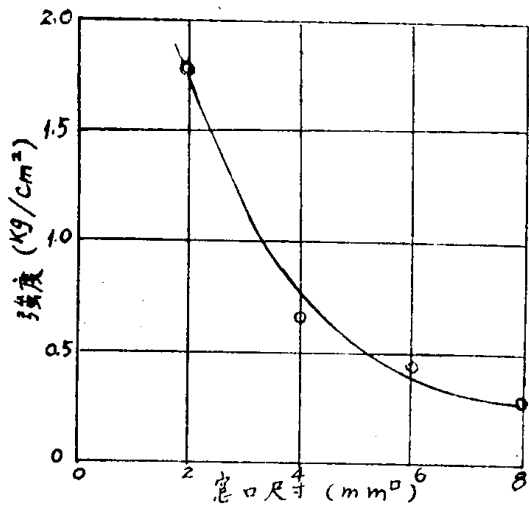


图 13 多层结构掩模强度

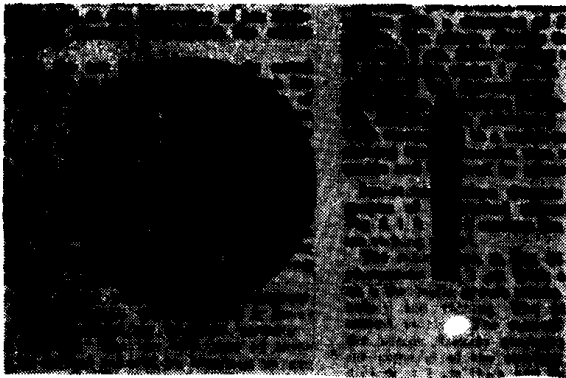


图 14 多层结构掩模

7. 系统的性能

图 15 所示是系统的外观图。x 射线源放

置在曝光箱体的上面。

图 16 所示是控制系统的方框图，在这个控制系统中，一台微型计算机控制着系统的运算程序。



图 15 x 射线光刻系统

利用许多掩模作多次曝光试验来评价 x 射线曝光系统的性能。对准精度及对准时间—粗对准和精细对准所需的时间是评价的依据。如表六所示，能够获得粗对准精度在 $\pm 3\%$ 以内。在精度为 $0.1\mu\text{m}$ 时，对准时间小于 30 秒。对准后每一分步的定位稳定性良好，例如可保持 $0.05\mu\text{m}/10$ 分钟。

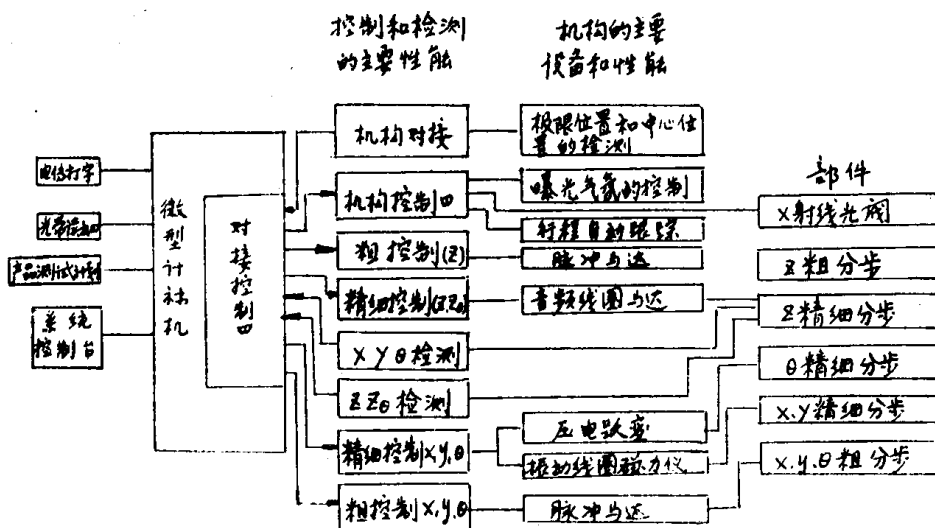


图 16 x 射线系统控制方框图

表六 对准精度和时间的数据

安置精度 (μm)	对安置点的位移量 (μm)			对准时间 (秒)
	Δx	Δy	$\Delta \theta$	
2.0	-1.935	1.185	0.025	3
0.5	-0.33	0.100	-0.130	15
0.3	-0.275	-0.180	-0.005	21
0.2	-0.145	-0.035	0.005	20
0.1	-0.030	0.035	-0.020	25

一个利用各种不同的掩模在同一基片上反复作定位和曝光的实验结果如图17所示,在每次曝光过程中由于有了化学刻蚀过程产生的嵌入物,线宽为 $1\mu\text{m}$ 的组合图形互相重叠起来了。复盖精度可达到 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以内。

因采用了硅靶(输入功率20kw)及 x 射线

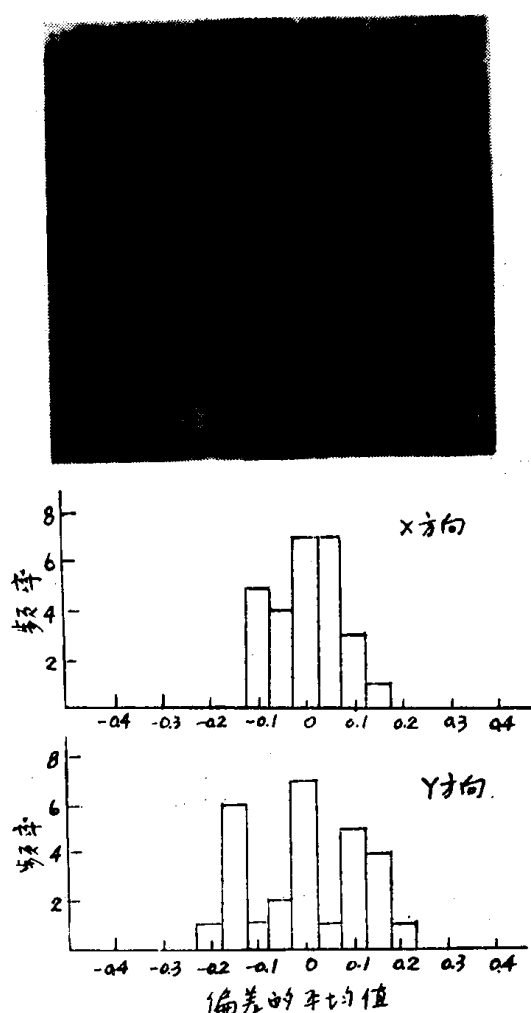


图17 用组合图形测量对准精度

源到基片为700mm的距离,用 $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ 灵敏度的正性光刻胶达到6分钟的曝光时间,用 $7\text{mJ}/\text{cm}^2$ 灵敏度的负性光刻胶达到1分钟的曝光时间。

通过 $2\mu\text{m}$ 正方孔,如图18所示,用各种不同的掩模对设计图形曝光,获得了良好的精度。

8. 提 要

对 x 射线光刻系统的研究和设计已经完成,包括对 x 射线源、对准和掩模的研究。一种实验性的 x 射线曝光系统已被制造出来。

这种系统采用了许多新方法,例如(a)有功率的 x 射线源,这种射线源具有输出频率大于20kw硅沉积的水冷旋转靶;(b)使用具有小于 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 分辨率的基片振荡定位检测;(c)具有小于 $0.05\mu\text{m}$ 移动分辨率的精细定位校正机构;(d)透明的 x 射线掩模。

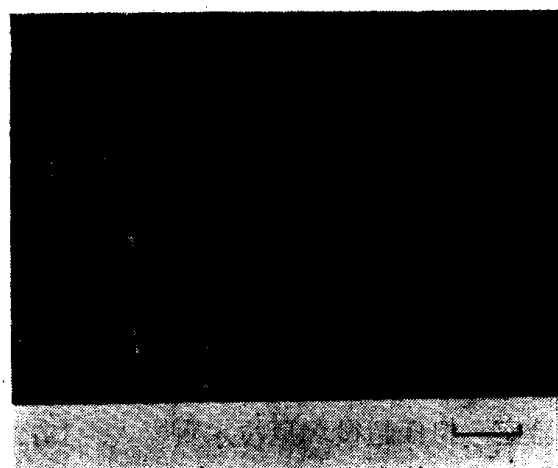


图18 用两种不同的掩模复制设计图形的显微照相

这个系统显示出 $\pm 0.2\mu\text{m}$ 的复盖精度。经过这方面的研究,实用的 x 射线系统的基本性能已经达到。然而,在 x 射线源、对准系统、掩模及光刻胶材料进一步改善之后,最后是否可下这样的结论,即 x 射线光刻必将成为一种实际应用于大规模集成电路图形复制的方法。

参 考 资 料

- [1] D. L. Spears and H. I. Smith High-Resolution Pattern Replication Using Soft X-Ray Electron Lett. 8, 4, p. 102, 1972.
- [2] S. E. Bernacki and H. I. Smith Fabrication of silicon Mos Derices Using X-Ray Lithograph. IEEE Trans, E. D. ED-22, 7, p. 421, 1975.
- [3] P. A. Sullivan and J. H. Mocoy: Determination of Wavelength and Excitation Voltage for X-Ray Lithograph. ibid ED-23, 4, p. 412, 1976.
- [4] D. Maydan, et al.: High Speed Replication of Submicron Featuerson Large Areas by X-Ray Lithgraph, ibid, ED-22, 7, p 429, 1975.
- [5] R. Feder, E. Spiller and J. Topalian: Replication of 0.1 μm Geometries with X-Ray Lithgraph, J. Vac Sci Technol, 12, 6, p. 1332, 1975.
- [6] A. Muller: A Spinning Target X-Ray Generator and its Input Limit, Roy. Soc. Proc. A 125, p. 507, 1929.
- [7] J. S. Greenwich: Efficient Continuum Sources for X-Ray Lithograph, Appl, Phys, Lett, 27, p. 579, 1975.
- [8] J. S. Greenwich: X-Ray Lithograph: Part I-design Creteria for optimizing Resirt Energy Absorption; Parf II-Pattern Replication with Polymer Masks, IEEE Trans, E. D. ED-22, 7, p. 434, 1975.
- [9] W. J. Oosterkamp: The Heat Dissipation in the Anode of an X-Ray Tube, Philips Res, Rep, 3, p. 303, 1948.
- [10] S. Yamazaki, et al.: X-Ray Exposure System Vsing Finely Position Adjusting Apparatus, J. Vac Sci. Technol, 15, 3, p. 987, 1978.
- [11] E. Bassous, et al.: High Transmission X-Ray Masks for Lithographic Applications, Solid State Technol, 19, 7, p. 55, 1976.

沈建森译自 Reivew of the Electrical Communication Laboratories Vol. 27, № 1—2, (1979)
钱振邦校)

人物介绍——小资料

亨利·史密司 (H. Smith) 对从事半导体事业以及制造大规模集成电路设备、仪器的工作人员来说颇为熟悉。他首先将软X射线用于精细加工和超精细加工上，这在国际上有一定的影响。他的研究成果很多，就X射线曝光机就有四项专利。以下将其生平简介之。

史密司 1937 年 5 月 26 日出生于美国新泽西州泽西市。1960 年在波士顿学院获得物理学硕士学位。从 1960 年至 1963 年在坎布里奇空军研究室从事地球物理系和微波超声波研究。1963 年以后又回到波士顿学院，并于 1966 年获得固体物理哲学博士学位。1968 年加入麻省理工学院林肯实验室，担任超微测量技术负责人。1977 年被任命为电子工程学副教授，他是物理学会和电气与电子工程师协会会员。

史密司提出的人造显微结构观点将发现重要的新用途，不仅可用于微电子学和信息存储，而且也可用于材料科学、生物学、催化、X射线成象及光谱学、有机分子控制和物理学。

史密司和他的同事们们在人造微细结构发现方面主要创造发明有：发明类似照相制版印刷术的超微测量；发明用X射线光刻加工器件；发明应用电子扫描光栅变形的波纹技术；发明用干涉测量的掩模控制技术等等。还作了在电子束制版中外延实验及电子散射作用的理论研究。

他以科学家的名义在 1970 年访问法国汤姆逊通用无线电电报公司，1972 年访问英国伦敦大学及 1976 年访问挪威。他参加过国内外各种技术会议并作报告。并享有很高的声誉。世界上不少国家曾先后邀请他访问和作学术报告，我国也将邀请亨利·史密司博士来访。

编者

X 射线 曝 光 装 置

稻田雄史

1972 年 Spears 和 Smith 首先用软 x 射线的接近式光刻机, 制造出表面弹性波器件, 显示了 x 射线光刻具有高分辨率的可能性。在复印 1 微米左右线条时, 如果用紫外线复印技术, 将受到光衍射的强烈影响; 而在 x 射线曝光技术中, 因几乎不受此影响, 而能得到良好的图形。此后, 作为超大规模集成电路, 高密度磁泡存储器和高频晶体管的掩模制备技术研究的一个中心问题, x 射线曝光技术的研究得到了进一步的发展。

一方面, 电子束曝光装置得到惊人的发展, 市场上出售有较高速描绘图形的装置。市场上所见的产品中, 有 Bell 研究所的 EBES 装置⁽²⁾, 描绘 1 微米线宽掩模图形, 以 0.5 厘米²/分, 描绘 2 英寸的掩模需要 1 个小时。在描绘超细线条的掩模图形时, 必须具有比上述更多的时间, 为了弥补这不足之处, 使复印 1 微米左右的微细图形只要几分钟至十分钟时间, 因此更须重视 x 射线曝光技术和远紫外曝光技术的研究^[3]。

在 x 射线曝光中, 可以用接近法光刻复印出高精度的超微线条图形, 并且能得到其他光刻得不到的极高纵横比的图形。但是, x 射线曝光技术还正在发展中, 作为其基础的 x 射线源, x 射线曝光用的掩模, 位置的瞄准系统及 x 射线曝光用的光刻胶等等, 现在正在研究中。到 1976 年为止, 已经有一些文献作了概括的介绍^[4~6], 这里简单地叙述 x 射线曝光技术的概要和特点, 其中以 1977 年的技术文献作为叙述的中心。

X 射线曝光的原理和特点

x 射线曝光系统与普通紫外线光刻中非接触式投影基本相同, 其示意图于图 1^[6]。用 x 射线曝光, 在能透过 x 射线的掩模版上, 形成吸收 x 射线的掩模图形, 由软 x 射线将其图形复印于基片上的 x 射线光刻胶上, 形成潜象, 光刻胶中潜象显影方法与普通光刻方法相同, 显影后得到与掩模图形相同的光刻胶图形。

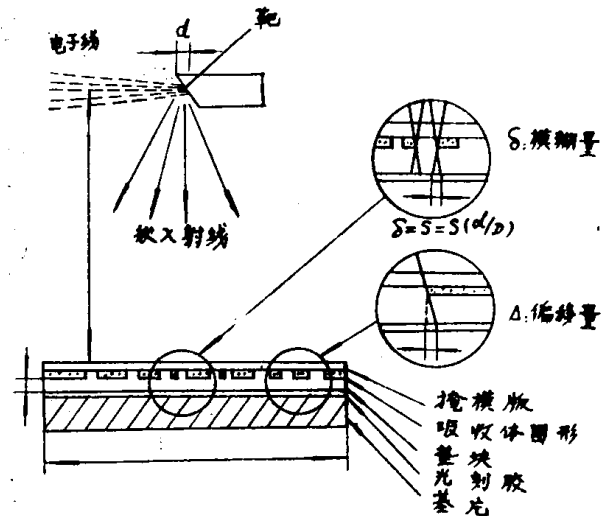


图 1 x 射线曝光系统示意图

x 射线的特点

1. 与光相比, 几乎不存在衍射, 散射和反射, 掩模与基片不接触, 因此可以得到具有高分辨率的复印图形。

2. 与电子束相比, 后者的散射现象少, 直射至光刻胶中, 即使光刻胶的厚度比较厚, 也能形成微细图形。

3. 对于图形疵病的根源之一灰尘具有透过性; 这里, 灰尘的影响是小的。

4. 与电子束相比, 其原理简单, 成批生产的话价格有可能便宜。

另外, 下列问题也应作为它的特点:

5. 掩模的制造比普通光刻复杂, 价格也贵。

6. 超微细图形的高精度掩模对准机构研究较迟。

7. 曝光时间长, 接近普通光刻的曝光时间(一分钟左右), 要求大功率的 x 射线源和高敏感度的光刻胶。

在紫外光刻中, 用投影法或接触法, 这两个方法复印2微米线宽的图形已达极限。要形成超微细图形和具有高纵横比的光刻胶掩模图形, 具有特点1和2的 x 射线曝光, 因为它曝光强, 所以它已成为非接触式复印超微图形唯一的高精度方法。同时特点3, 近年来对于2微米左右的图形来说, 用过去保留至今的技术, 以及引人注目的远紫外曝光法也都不能具有这一有力的特点。但是, x 射线曝光中的特点4将受如何解决5、6这些问题的影响, 因此, 最近的研究工作必然地集中到这些问题。下面叙述 x 射线曝光系统的主要结构。

X 射线曝光系统

x 射线曝光系统使基片与掩模不相接触, 然而用散射的 x 射线束复印图形, 会产生如图1所示的半影现象, 叫做“模糊量” $[\delta]$, 引起几何学上的“偏转” (Δ) 。但是, x 射线源的直径为 d , x 射线源与掩模间的距离为 D , 掩模与基片之间的间隙为 S , 以及基片的直径为 W 。假定 $d^{[*]}$ 为几毫米, D 为几百毫米, S 为几微米, 则 δ 可能在0.1以下 $^{[7]}$ 。

另一方面, 在重叠曝光时, 间隙 S 如果有误差, 几何偏移 Δ 就会引起图形位置的偏移。这时, 要使这个位置偏移达最小程度, 必须加

大 x 射线源与掩模之间的距离 D 。因为把发散束作为 x 射线源, 图2所示, 在不同间隙 S 的误差时, 曝光时间与基片大小的平方成比例地增加 $^{[8]}$ 。下面提出一些解决这个问题方法, 在设计系统时, 必须加倍注意。

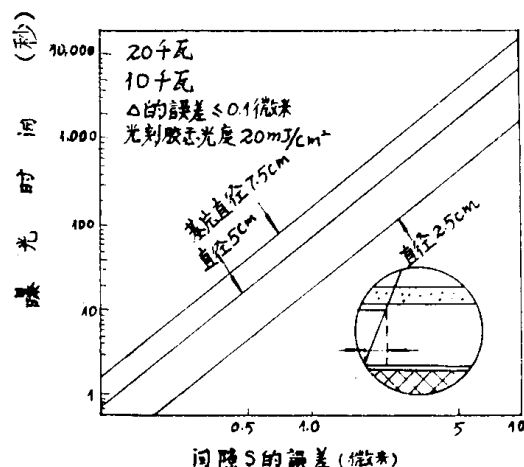


图2 曝光时间与曝光时的掩模与基片中误差的关系 $^{[8]}$

下面将叙述作为 x 射线曝光系统基础的 x 射线源, x 射线用的掩模及位置的瞄准系统。

1. x 射线源

曝光用的 x 射线源通常用加速电子照射靶, 即所谓电子束激励 $^{[1]}$ 。用此方法, x 射线的效率以量子化效率表示, 通常入射电子束为1瓦 $\sim 10^{-4}$ 瓦/球面角度, 是非常小的。因而, 从电子束盖镀用的E型电子枪 $^{[1]}$ 来的电子束成为输入功率很大的旋转阳极靶 $^{[9]}$, 至目前所知, 其中最大功率的 x 射线源是同步加速器的环形辐射(SOR) $^{[10]}$, 虽然它可以用作 x 射线源, 然而如果 x 射线要强, 那末射线源的价格也就高。 x 射线源现在最寄予希望的是用旋转阳极靶, 其加速电压可能是10~30千伏, 水冷电子束的输入功率可能为10千瓦 $^{[9]}$ 。作为 x 射线源的SOR, x 射线束的方向性良好, 由于发散角小, 所以可作为研究用的0.5微米以下图形的复印, 并复印500Å以下的图形。 $^{[10]}$

2. 掩 模

在高精度复印微细图形时, 必须有效地利用 x 射线曝光的特点, 适当选择 x 射线的波长, 掩模的基片及掩模材料。图3 $^{[11]}$ 表示了

$^{[*]}$ 译者注: 此处原文有误。

各种各样材料的吸收系数与 x 射线波长的关系。使吸收系数的下侧组作为掩模的基片，上侧组作为 x 射线的吸收材料，关于这些，已有较多的报告叙述过^[12~15]。从图3中可看到如果 x 射线的波长越长，则吸收体图形的反差就越大。这时用 x 射线曝光可得到良好的图形。例如：当波长为 $4.6\text{\AA}$ (Rh- L_2 线)由于掩模吸收少，即使厚度比较厚而反差也低，同时像的分辨率也低。另一方面，如果使用波长为 $44\text{\AA}$ (C- K_2 线)，即使用比较薄的靶日灵掩模等，则像的图形衬度就比较高^[15]。但是，这种波长易受灰尖的影响，必须在真空中使用。作为它们的折衷值是采用波长为 $13\text{\AA}$ (Cu-L射线)和 $8.34\text{\AA}$ (Al- K_2 射线)。对于掩模来说，使用质量吸收系数小的元素制成的，对 x 射线透过率良好的材料作为基片，膜层没有挠曲，而是平滑的，要求能经受图形的加工处理。为此，可以对 $4.37\text{\AA}$ (Pd-Ld线)^[16]和 $4.6\text{\AA}$ (Rh-L射线)^[13]使用卡普通和聚酯树脂对 $8.34\text{\AA}$ (Al- K_2 射线)^[15]使用聚酯树脂和靶日灵，以及对SOR^[10]使用聚酯树脂和靶日灵或Si^[20]。

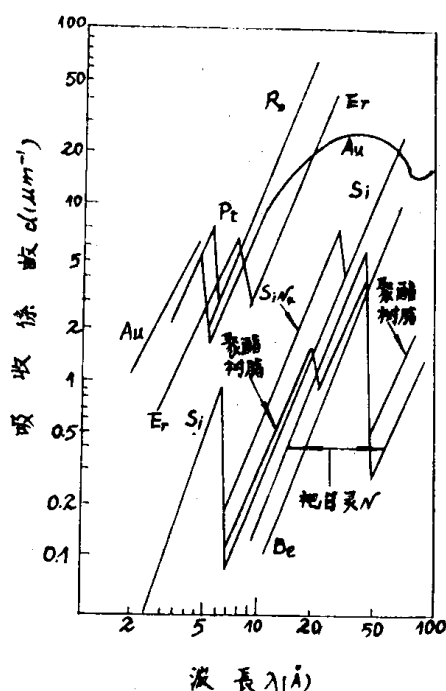


图3 最吸收软 x 射线及透过的材料的吸收系数^[11]

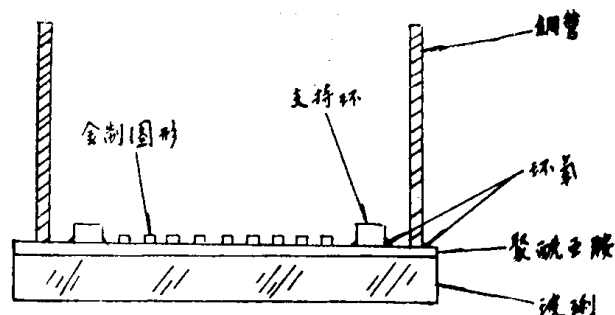


图4 贴紧聚酰亚胺薄膜的支撑环和铜管的剖面图

早就试验用于Al- K_2 射线的掩模，它是这样制备的：在n形<100>Si基片的研磨上扩散B，其上形成金的吸收图形，然后利用硅的选择蚀刻性，保持吸收的图形有2~5微米厚的薄膜层^[7]。但是，这个掩模中，对于可见光透过率是不好的，掩模的瞄准也困难，因此就提出了很多办法。E. Bassons等人将SiO₂膜组合在Si₃N₄膜上，制成透明的掩模，为了提高强度，试用了铃木等人制造的Si₃N₄-SiO₂-Si₃N₄三层结构的方法，或者用定村等人将靶日灵膜贴附的方法。这种掩模的透明度很好，但有个缺点是掩模基片本身很脆。很好使用聚酯树脂和卡普通薄膜，可以得到比较坚固的掩模基片^[13]。但是，这些聚合膜采用市场上的薄膜，厚度比较厚，达3~25微米， x 射线显著减弱，同时，容易进入灰尘。因此，为了解决这些问题，Flanders等人^[24]提出了用聚酰亚胺作为薄膜的方法。如图4所示，将聚酰亚胺(dupont产品P12530)用离心法涂制于200微米的玻璃基片上，涂层厚0.5~5微米。把它加热到150℃，15分钟，然后再加热250℃，60分钟，即成了聚酰亚胺。在玻璃基片上的聚酰亚胺膜层上，形成了吸收体图形，然而对于离子蚀刻等玻璃基片成为一种散热器，得到良好的图形。其次，此膜上用环氧树脂将支持环和铜管粘结，如图5所示，放在稀释氟酸中，将玻璃进行蚀刻。此时，在铜管中注入异丙醇，防止蚀刻液浸透，可以保护吸收体图形。这样得到的聚酰亚胺掩模没有灰尖等

的缺陷。例如,已有文献报导对于直径为19毫米的掩模,在直径7.5毫米部分可以解决 2×10^{-5} 的畸变。但是,用这样方法制造出来的聚合物掩模是否能使用于形成大规模集成电路等的图形,其尺寸精度,掩模形成的难易程度和合格率等等问题,尚有待于今后的研究。

上述问题之一,基片与掩模之间的间隙误差的控制方法,已有好几种提案。Smith等人^[8]在氦气氛中,使基片真空吸附于基准面上,将掩模瞄准另一基准面,用此方法进行控制,或者对掩模本身进行控制,对于硅掩模凸缘,在多数情况下具有直径为数微米,长为10~25微米,因此,提出了保持间隙误差在10~25微米 ± 1 微米的范围内的方案,图2条件下,直径为7.5毫米的基片也要曝光3分钟时间。但是,这样的掩模形成法是很复杂的,因此Hnghes^[25]提出了另一种方法,即采用 x 射线曝光的接近复印法,用聚酯树脂作为掩模版,把金吸收图形蚀刻于基片的光刻胶侧面与反面,也即 x 射线的入射侧面,光刻胶与吸收体的间隙取决于聚酯树脂掩模版厚度的误差。在此报告中,使用3微米的聚酯树脂膜做电可变只读存储器(EAROM)试验,多次瞄准时,几何偏差问题是不存在的。尽管这个方法也许会发生位置的瞄准问题,但它还是成为非常有趣味的方案之一。

3. 位置的瞄准系统

x 射线曝光系统除位置瞄准的机能之外,其适用范围是很狭的,仅限于形成单电平磁泡存储器器件和表面波器件用的图形。但是已经有文献^{[25][26]}报导了迄今为止由光学对准器组合而成的 x 射线曝光系统。

在超微细图形的复印时,所介绍的掩模和基片的重合精度考虑在0.1微米范围内,在位置检测方面,已提出采用透过 x 射线和荧光 x 射线的方法^[4]。装置方面,由山崎等人作了归纳报导^[2]。他们使用振动法,作为光标记的检测方法,能检测 ± 0.1 微米以下。现已研究了安装有这种检测器的电动变换器,设计了能高

精度地进行位置瞄准的装置。

另一方面,用衍射光栅相互干涉进行位置瞄准,则瞄准精度可达 ± 0.1 微米,从原理上来说,也可以达 ~ 0.01 微米,Anstin等人作了如下的方案和实验结果的报告^[28]。由图6可知,作为基片与掩模上各个位置的瞄准标记,形成周期为1~20微米的衍射光栅。光源用He-Ne激光。当激光垂直照射在位置瞄准标记上时,也就是掩模与基片的位置一致的场合,从掩模的标记直接衍射的+1级衍射光与从基片的衍射光栅衍射的+1级衍射光以相同的方向衍射。

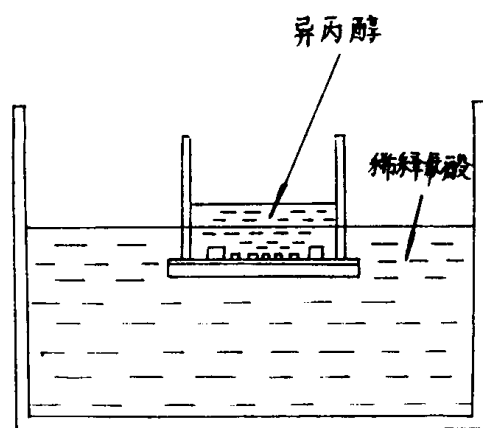


图5 聚酰亚胺薄膜下玻璃基片进行蚀刻时保护吸收体图形的方法^[24]

从掩模的标记衍射的-1级衍射光被基片标记所衍射,产生+2级衍射光,可是其方向与来自掩模和基片的+1级衍射光相同。同样的,各从掩模与基片上的标记产生-1级方向的衍射。如果,这些分别是+1群和-1群,那么这些群之间的光强度是一致的。图6第1群中,正方向与负方向的光群强度分别通过截光器,由光探测器接收,进行比较后,进行异模位置瞄准。

他们又对掩模上的标记和基片上的标记互相之间的转动和平行度进行了研究,以及对掩模和基片的移动方向进行判断,为了进行位置瞄准,使用一组相互间周期略有差异的标记,并进行了研究。在此方法中,用周期为1.2微米的衍射光栅,位置瞄准精度可达 $200 \text{ \AA}$,当周