

大规模集成电路专用设备研讨暨学术 交流会部分论文选(中)

目 录

光 刻

- 参观84年美国半导体设备和材料展览会..... (1)
- JK—1型接近式光刻机图形传递特性分析..... (3)
- 国外分步重复投影光刻机(DSW系统)动态..... (15)
- 1:1扫描投影光刻机实验气浮导轨..... (23)
- 适用于微细投影曝光的自动调焦调平系统..... (31)
- “环带校正板”在接近/接触式光刻机照明系统中的应用..... (36)
- 国外光刻机的发展趋势..... (44)

测 试

- 掩模质量和质量检测..... (47)

其 他

- 干法腐蚀终点检测综述..... (56)
- 集成电路专用设备ZPZ——1型自动芯片粘结机..... (65)
- 高速、多相、高精度、程控时钟发生器..... (69)

报 道

- 为集成电路光学专用设备的发展献计献策——研究讨论暨学术交流会情况..... (74)

参观84年美国半导体 设备和材料展览会

唐 九 华

中国科学院参观美国SEMICON/WEST 84展览会小组一行五人于1984年5月19日起程, 6月4日回国。其中5月22~24日为展览会参观, 另外还参观了

APPLIED MATERIALS公司

SEEQ TECHNOLOGY公司

HEWLETT PACKARD公司集成电路
工艺研究实验室

贝克来加州大学电子学研究实验室

IBM公司在纽约州EAST FISHKILL镇的
集成电路生产及研究设施

通过这些活动了解到美国、日本等国集成电路专用设备的发展趋势, 在大小型工厂和实验室中的使用情况及某些具体构造。简要情况如下。

1. 市场背景

从83年开始到84年第一季是半导体器件行业建立以来的第二次兴旺高潮, 需求大增。近半年逐月订货与交货金额之比保持在1.5:1左右。特别热门的是双极逻辑电路、MOS存储器某些微处理机芯片。经销商对中国近来需进口微机和集成电路猛增感到意外。市场销售的兴旺大大促进了集成电路及其生产设备行业的发展, 据统计美国集成电路工业计划新建生产线一百条以上, 多数将在1986年后陆续投产。

2. 设备技术水平

集成电路芯片工艺设备的新展品大都以处理6英寸硅片的能力相标榜, 如PERKIN ELMER公司的660型扫描投影光刻机, NIKON的1500B型分步重复光刻机等。只少数

仍为以前的5英寸。而硅单晶厂家则展出8英寸甚至9英寸的硅片样品。但从关键的微细加工设备展品的成熟程度来看, 大多数要到84年底后才能有供出售的产品。

在器件厂的生产线和实验室的研究线中大部分正在使用的硅片是4英寸, 据大型厂说有少数5英寸的设备。故美国器件工业的设备向6英寸硅片过渡将从85年开始, 而5英寸这一档设备可能不会大量采用。这对我国制订相应的技术政策是需要重新加以考虑的一个重要问题。

在展品中反映出各种新技术的进展极为迅速。如:

(1) TRE公司展出新原理的激光图形发生器, 采用氩氟激光器, 有16个光束并行扫描, 形成线条分辨率2.5微米。据称其效率比传统的光学图形发生器快20倍, 比电子束制版快6倍, 而价格仅为后者的1/3到1/2。此外用准分子激光, 波长308毫微米, 脉冲频率大于100次/秒, 作为图形发生器的光源, 也是今年新宣布的。

(2) 已有不止一家公司制成聚焦离子束光刻系统, 束斑可至0.1微米, 具有多种用途, 如: 扫描离子显微镜、掩模修整、次生离子质谱、无掩模离子注入掺杂。看来很有前途的离子束技术已成为实验室装备的现实。

(3) 西德ZEISS公司宣称将发展一批新的亚微米光刻镜头, 波段为i线, 有生产型的和研究型的, 最细分辨率可达0.70微米。

(4) 83年展出MICRONIX公司的新产品X射线光刻机曾引起人们的注意。今年该公司又增加展出X射线掩模胚,材料为氮化硼,镀上金属。这是X射线技术走向工业生产又进了一步。另据报道,PERKIN ELMER公司正在按合同研制X射线分步重复机,用于制造线宽为0.5微米的军用超高速硅器件。

在我们参观的生产线中,不论大厂或小厂,线宽2~3微米的工艺,以干法刻蚀为主。分步重复光刻机即使在小厂中也有很多台在正常使用。掩模的保护膜已用于生产。这些说明新技术普及的速度很快。但是芯片的后工序,如压焊、封装等不论在展览中还是在生产技术中都无重大进展。

3. 检验设备品种数量大增

参展的检验设备厂商数量和展品品种在展览会中占很大比重。各国著名的光学厂都从事集成电路行业所需检验设备的生产和研制。如美国的BAUSCH & LOMB, PERKIN ELMER, AMERICAN OPTICAL CO., 西德的ZEISS, LEITZ, 日本的NIKON等。反映了随着器件集成度的增加,检验工作在生产中的地位显得更重要这样的客观规律。

掩模检验仪大多是用标准模板比较法。

硅片工艺的检验问题较为复杂,故发展了多种新技术手段。今年西德ZEISS首次展出激光扫描显微镜,光斑0.4微米。用于半导体材料和器件的检验有特殊的功能。至于红外显微镜和超声显微镜则是前些年已展出的,由于可透过半导体材料,而可检验芯片的内部和结合部的质量。伽玛射线背向散射测膜厚也有多种展品。

趋势是把多波段成像和识别技术(包含上述各种手段和X射线、扫描电镜等)应用于工序检验、控制和最终测试。

4. 自动化

在展览的同时还举行了技术报告会,今年的主题是自动化,分为三个专题:工序自

动化、检测、系统自动化的经验。

复杂的设备多数采用微处理机控制,使设备保持在最佳工作状态,提高效率和成品率,减少人工操作,还有利于保持洁净。

在单机自动化的基础上进一步将设备联成自动线,是这次展览反映的趋势。GCA公司的三种设备(光刻WAFER STEPPER 6300B;传送WAFER TRACK 1006;刻蚀WAFERETCH 606)就是如此。PERKIN ELMER等公司也发展了机械手,在密封条件下将硅片传送和定位。VARIAN公司展出了传送系统的模型。

硅片工艺的整条自动快速周转线在IBM EAST FISHKILL已运行了一些年,今年的技术报告会上介绍了其全线计算机控制系统的结构。其他大公司也有类似的介绍。

贝克来的电子实验室在一台反应离子刻蚀机上加装了探测器,监测该机的主要性能参数,并通过电话线传到该设备的制造厂,使之随时了解工作情况,以便及时维修。在将来高效自动生产线上,这样的遥测系统无疑是很有用的。

5. 设备布局

通过参观几处有代表性的集成电路生产线和研究线,我们了解到超净室或车间的布局经历了三代。第一代是各设备分别放置在小房间内,但这样不便于工艺和设备的经常更新。于是第二代变为大的超净室,可容许多设备。第三代的特征是活动间壁和维修走廊,各设备按工艺流程和洁净等级分区布置,可由活动间壁组成一些小房间,而其附属设备(管道、气瓶、真空泵、部分电气柜等)放在维修走廊内。

集成电路生产设备每星期需两天停机维修才能保证其余四天连续三班生产。

一些接待我们的人士(曾参观过我国不少代表性的工厂)谈起,国内对车间的布局、设备更换、洁净、维修服务等关系尚

(下转第22页)

JK—1型接近式光刻机

图形传递特性分析

邬纪泽

中国科学院光电技术研究所

引 言

光刻是制造大规模集成电路(简称LSI)的微细加工技术的核心。光刻的实质是将掩模的电路图形正确传递到硅片上,形成多层的微沟道图形。随着LSI集成密度的提高,图形的最细线宽日趋缩小(如16K RAM动态随机存储器的最小线宽为3.5~4.5微米,64K RAM为2~3微米),光刻设备的传递特性将成为限制微细图形加工和控制LSI器件成品率的最重要因素之一。

实现光刻图形的正确传递,主要依赖于三个环节。第一,光刻设备——传递工具的性能;第二,光刻工艺——光致抗蚀剂的光化学特性,涂胶、显影和腐蚀等工艺处理的控制;第三,掩模和硅片的质量。

一接近式光刻图形传递的特点

1. 图形传递的原理

掩模的图形信息,通过曝光传递到硅片上的光致抗蚀剂涂层上,经显影、腐蚀等光刻工艺在硅片衬底上形成很浅的沟道图形。用掩模上的对准标志作基准,使各块掩模的图形套合在硅片上,重复上述曝光等工艺,最终组成多层沟道的集成电路芯片器件。

2. 接近式光刻的特点

为克服接触式光刻的缺点,七十年代初开发了接近式光刻技术。

其特点是,采用无接触状态进行曝光,可避免掩模和硅片的划伤,大大增加掩模利用率,提高光刻成品率。自动输片的接近式光刻机生产率高,售价比投影式低得多,这些优点使它很适合于中大规模集成电路(线宽为3微米以上)的光刻生产。在各国

集成电路光刻生产线上,目前仍有 $\frac{1}{4}$ ~ $\frac{1}{3}$ 左右光刻设备采用接近式光刻机。预测今后五至十年我国将以接近式和投影式取代原有的接触式光刻机。以适应LSI微细加工发展的需要。

3. 接近式光刻的图形传递原理

JK—1型接近式光刻机采用多点光源(复眼透镜)的照明系统实现硅片与掩模在分离状态下曝光(分离间隙一般为5~40微米)。掩模的微细图形的光学衍射效应以造成的象模糊由于多点光源以平行光共同照明掩模,使狭缝的衍射象被错开,能量相互叠加而使次峰受到极大地抑制。这称为位相错动强度叠加原理^[1]。

接近式图形传递原理与接触式复印曝光不同,掩模图形信息是经过空间传播而成象的。

按照夫琅和费的衍射理论,缝宽为 $2a$ 的

系统在 $f = 15$ 微米时, 获得实用的最细线宽为3微米。样机在光刻生产线考核中成功的试制出两批4K和16K集成电路模拟流片, 表明采用接近式光刻可以适应4K和16K MOS集成电路的生产。

该样机照片见图2。



图2 JK-1型接近式光刻机照片

二、影响图形传递特性的因素分析

光刻器件的成品率是最终表征图形传递性和传递质量的指标, 掩模的缺陷密度和光刻图形的传递特性(包括光刻设备和光刻工艺)对器件成品率起决定性影响。

图1给出了影响接近式光刻图形传递特性的三大因素: 即光刻机工艺和掩模及硅片的质量。

这里着重讨论光刻设备因素的影响。

评价光刻设备图形传递特性主要指标是:

- 光刻分辨率——图形传递的能力
- 线宽控制精度

(一) 图形传递能力的分析

1. 系统传递函数MTF

采用传递函数来评价光刻设备的性能是基于两点:

第一, 传函反映了曝光系统所传递的空

间图形成象本领, 而不依赖于光致抗蚀剂的传递特性。

第二, 传函表征了光刻设备的基本光学性能。

(1) 光学传递函数MTF

根据付里叶光学原理, 光学系统传函可用物体频谱与成象面像的频谱表征, 即

$$MTF = \frac{u_1(u_x, u_y)}{u_0(u_x, u_y)} = \frac{\text{像的频谱}}{\text{物的频谱}} \quad (3)$$

接近式光刻机的光学传递函数可表示为

$$MTF = \frac{M_{wafer}}{M_{mask}} \quad (4)$$

由于所传递的图象的调制度是空间频率的函数, 故(4)式用调制度表示为

$$M_{mask} = \frac{I_{1max} - I_{1min}}{I_{1max} + I_{1min}} \quad (5)$$

$$M_{wafer} = \frac{I_{2max} - I_{2min}}{I_{2max} + I_{2min}} \quad (6)$$

式(5)为掩模面图形的空间相对光强分布, 式(6)为硅片成象面的空间相对光强分布。通过计算或实验测试确定两者的大小, 便可确定传递函数。

令掩模面上物对比度 $M = 1$,

硅片象面的相对衍射强度分布:

① 按夫琅和费衍射场理论, 平行光照明(单点光源)一个狭缝, 距离掩模面 $f = 15$ 微米的象面上相对衍射强度, 用式(1)计算, 结果列于表1表中。

表1

狭缝宽度b(微米)	2	3	4	5
$a = \frac{1}{2}b$ (微米)	1	1.5	2	2.5
I_{2max}	0.999	0.999	0.998	0.995
I_{2min}	0.238	0.046	0.017	0.0019
$M_{wafer} = \frac{I_{2max} - I_{2min}}{I_{2max} + I_{2min}}$	0.615	0.912	0.967	0.986
空间频率(对线/mm)	250	166.6	125	100

* I_{2min} 指a处的光强

② JK-1型复眼照明系统, 考虑平滑衍射效应的影响, 衍射的相对强度分布, 用式(2)计算, 结果列于表2中。

($f = 15$ 微米)

表2

狭缝宽度b(微米)	3	8	4	5
$a = \frac{1}{2}b$ (微米)	1	1.5	2	2.5
$I_{1\max}$	0.905	0.910	0.895	0.888
$I_{1\min}$ *	0.315	0.058	0.022	0.003
$M_{\text{wait}} = \frac{I_{1\max} - I_{1\min}}{I_{1\max} + I_{1\min}}$	0.484	0.880	0.952	0.993
空间频率(对线/mm)	250	166.6	125	100

* $I_{1\min}$ 指a处的光强

算式中代入本系统的参数如下:

$n = 5$; $2n + 1 = 11$; 孔径半角 $\theta = 3.6^\circ$;

$\delta = 0.0328$ 微米; $\lambda = 435.8$ 毫微米; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$= 14.418$; 设 $f = 15$ 微米; $a = 1, 1.5, 2,$

2.5微米。

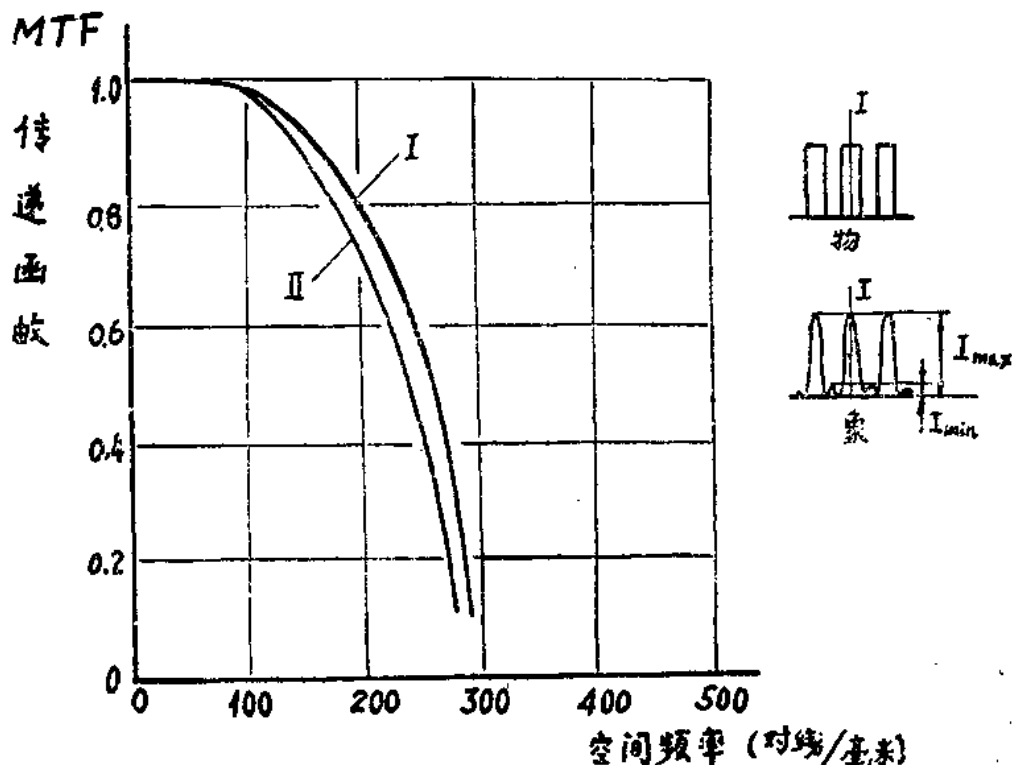
现举 $b = 3$; $a = 1.5$; $f = 15$ 的例子, 说明式(2)中单缝衍射和双缝衍射的作用大小。式(2)中等式右边括弧内第一大项为单缝衍射强度分布; 第二大项的双缝衍射的强度分布。计算结果为:

$$I_{1\max} = (I_{1\max})_{\text{单缝}} + (I_{1\max})_{\text{双缝}} \\ = 0.901 + 0.009 = 0.910;$$

$$I_{1\min} = (I_{1\min})_{\text{单缝}} + (I_{1\min})_{\text{双缝}} \\ = 0.057 + 0.0013 = 0.058$$

可见双缝衍射的作用仅为单缝的1~2.2%, 其贡献是很小的。

用表1、表2的数据作出图3, 表明本照明系统传递图象的本领(曲线I)很接近按夫琅和费衍射理论计算的极限分辨能力(曲线II)。由于复眼透镜系统对狭缝衍射的平滑化作用, 使所传递的图象由模糊变为清晰, 达到光刻实用线条的要求。



(图3) JK-1型接近式光刻机的计算传递函数曲线

I、按公式(1)计算的夫琅和费单缝衍射的MTF

II、按公式(2)计算的接近式曝光系统的MTF

③ 接近式曝光结果推算本系统的模拟MTF

由于条件的限制，我们用标准线宽的光刻分辨率掩模版曝光一组不同分离间隙的光刻图形（图4），将光刻所达到的实用分辨率折算为空间频率；假定这样的图形传递具有传函 $MTF = 0.6^*$ 。同时找出同一次曝光

和显影条件下，图形边缘粘连，不能分开的线宽组大小，折算为空间频率值，并认为该频率是空间截止频率，假定 $MTF = 0$ 。由此推算出本照明系统在接近式曝光状态（ $f = 10、15、20、25$ 微米）的模拟传递函数。据此作出图5。

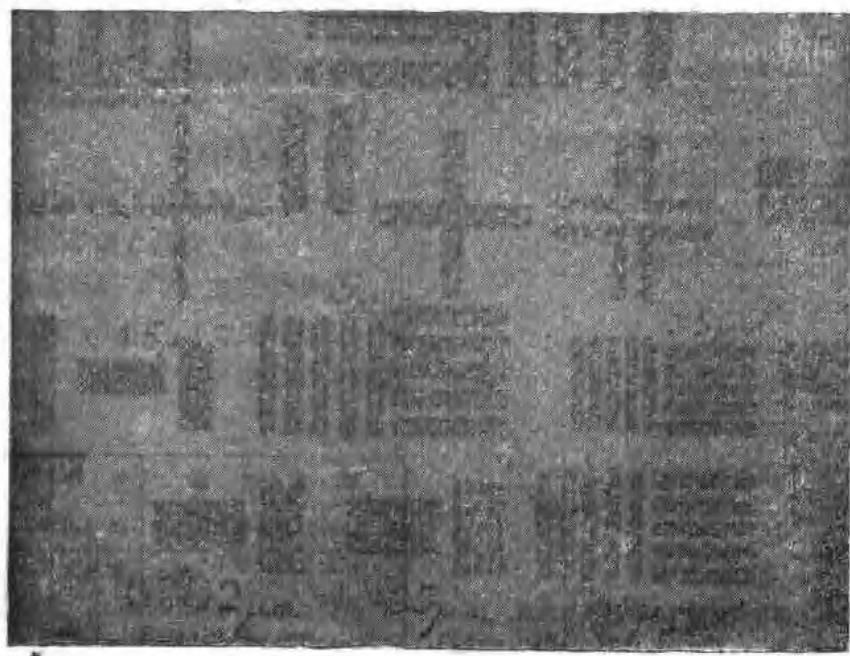


图 4

未氧化片；不平度 8μ ；曝光间隙 10 微米；AZ—1350J胶；胶厚 5600Å ；
曝光光强 $12\text{mW}/\text{cm}^2$ ；曝光时间 10 秒；照相放大 300 倍。

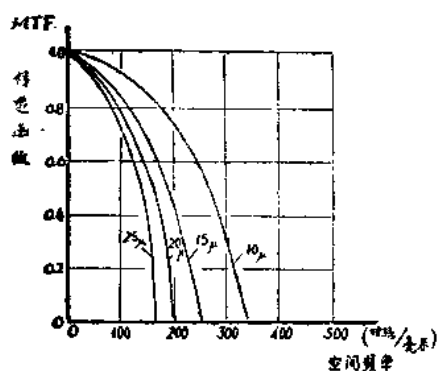


图5 JK—1型接近式光刻机曝光实验结果推算的模拟传递函数曲线（曝光间隙 $10\sim 25\mu$ ）

2. 曝光参数的影响

本机采用光强闭环反馈的恒光强控制系统。汞灯在低功率状态下点燃“等待”，当曝光时自动切换到高功率工作，提高了曝光效率，并延长了汞灯寿命。实验测得的获得较好光刻线条的光强与曝光时间的关系如图6所示〔2〕。

用最小二乘法，求出光强与曝光时间的指数回归方程为：

$$T^* = 63.4486e^{-0.1020I} \quad (7)$$

式中 T —— 曝光时间

I —— 光强

回归方程的相关系数 $r = -0.9253$

根据选用的光刻胶的灵敏度,掩模版的光密度,反射特性、胶层厚度等因素经试验选定合适的曝光参数。经试验推荐本机的光强值应选用 $15\sim 18\text{mW}/\text{cm}^2$ 为宜。

曝光量与线宽控制精度及显影后剩余胶膜厚度都密切相关,图7为实测的曝光时间与线宽变化的关系曲线^[10]。

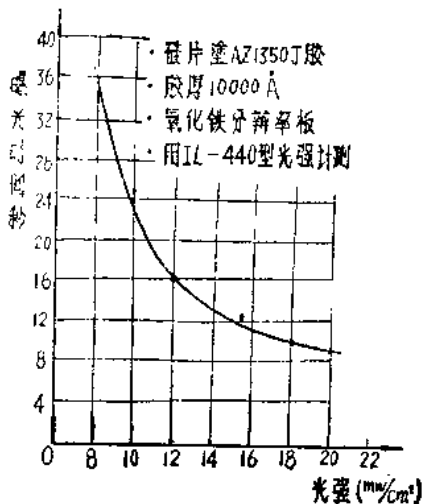


图 8

JK-1型光刻机实测光强与曝光时间的函数关系

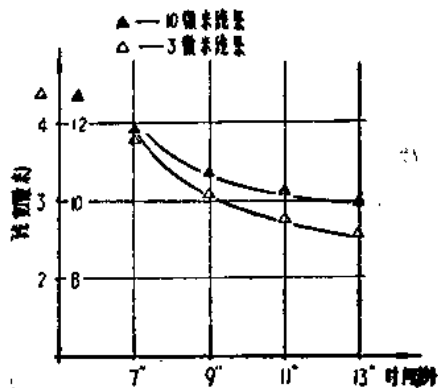


图 7 线宽—曝光量关系

注: 曝光试验条件

AZ1350J, $5600\text{\AA}$ (胶厚)

间隙 15μ

光强: $12\text{mW}/\text{cm}^2$

(带光栏)

减反Cr版Ⅱ。

3. 曝光间隙与光刻分辨率的关系

接近式光刻分辨率是曝光间隙和照明波长的函数,按单点光源的平行光系统照明,考虑双狭缝衍射+1级和-1级叠加的条件时有下列关系式^[8]

$$f = \frac{8a^2}{3\lambda} \quad (8)$$

$$\text{上式改写为 } a = \left(-\frac{3\lambda f}{8} \right)^{1/2}$$

设线宽(狭缝宽) $b = 2a$, $\lambda = 4358\text{\AA}$

(g线)

$$\text{则 } b = k(f)^{1/2} \quad (9)$$

式中: 比例系数 $k = 0.81$

f ——曝光间隙(微米)

表3为按式(9)的计算结果与实际光刻(正胶和负胶)的结果,两者是吻合的。按表3作出图8。

表 3

单位: 微米

曝光间隙	5	10	15	20	25	30
计算的分辨线宽	1.8	2.6	3.1	3.6	4.0	4.4
正胶光刻分辨率* AZ1350J	2	2.5	3	3.5	4	4.4
负胶光刻分辨率* OMR-83		2.8	3	3.9	4.5	5

(注)* 实验光刻分辨率均为有效分辨率,可实现光刻图形正常传递的。

上表表明,在同样间隙曝光,正胶(AZ-1350J)比负胶(OMR-83或302胶)的分辨率高,而且图形的对比度(边缘锐度)也较好,因此对于接近式光刻宜采用正性胶和铬掩模版曝光。

4. 其它因素对光刻分辨率的影响

(1) 曝光间隙设定重复精度的影响

本机的曝光间隙设定精度经鉴定为
 $26\text{曝光} = \pm 1.46\text{微米}$

由此带来的分辨率的变化为 δ_1

对式(15)微分: (设 $f = 15\text{微米}$,

$$\Delta f = 26\text{曝光} = 1.46\text{微米})$$

$$\text{则 } \Delta b = -\frac{0.81\Delta f}{2(f)^{1/2}}$$

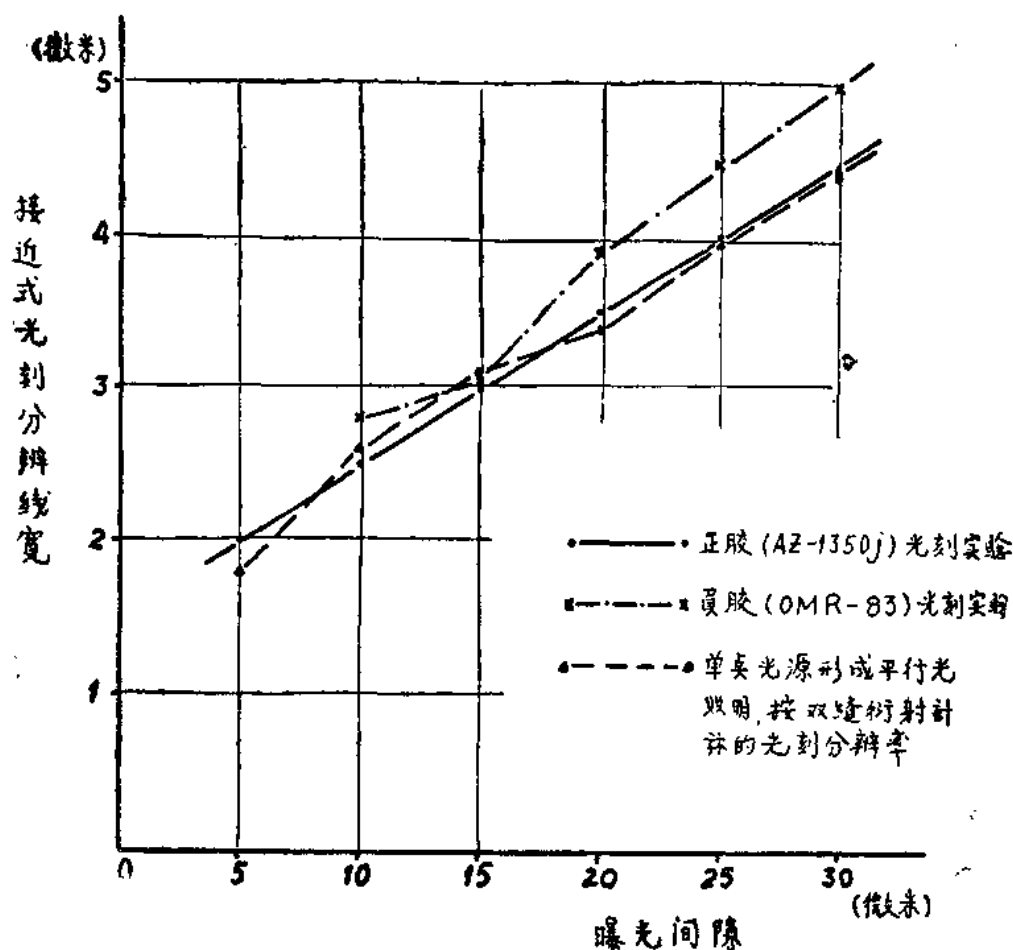


图 6 曝光分辨率与间隙的关系

即 $\Delta b = \delta_1 = 0.15$ 微米

(2) 硅片不平度的影响

硅片的不平度和经高温工艺处理产生的挠曲度, 都对每次光刻的实际分辨率带来影响。

本机采用真空吸平硅片和承片台与标准平板接触自位找平的措施, 使硅片不平度在承片台上得到一定的补偿, 检测表明, 原来不平度为 10 微米的硅片经真空吸片和承片台找平后残留不平度变为 5 微米。由此带来的影响为 δ_2 。

$$\delta_2 = 0.52 \text{ 微米 } (f = 15, \Delta f = 5)$$

(3) 掩模版不平度的影响

乳胶掩模版不平度为 5 微米左右, 若用光学玻璃板经母掩模翻版制成工作掩模其平整度将大为提高, 对于 3 英寸掩模不平度一般

在 2 ~ 3 微米内, 由此带来的影响为 δ_3 。

$$\text{得 } \delta_3 = 0.31 \text{ 微米; } (f = 15, \Delta f = 3)$$

(4) 光刻机的其他误差的影响

找平时标准平板与掩模版交换位置的定位误差, 找平机构误差产生的分离间隙不均匀等因素引起的曝光间隙变化的影响为 δ_4 , 设

$$\delta_4 = 0.2 \text{ 微米}$$

以上各项误差可综合为

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \pm 0.65 \text{ 微米}$$

从上述结果可见, 由于对分辨率影响均远小于设定间隙的影响。

(二) 线宽控制精度分析

曝光获得的实际线宽与掩模线宽的相对变化量称为线宽控制精度, 它是评价图形传递质量的重要指标。根据集成电路器件的半

导体性能要求,线宽控制精度应为掩模线宽的 $\pm 20\sim 25\%$,对于高要求的其裕限还要提高至 $\pm 10\sim 15\%$,这是相当苛刻的。

影响线宽控制精度的因素主要是设备因素和光刻工艺因素。现假定各种工艺因素如光刻胶吸收特性,涂胶厚度变化,显影、刻蚀等是理想的,这里不作深入分析。

光刻图形线宽的相对变化量可用图形的边缘斜率表征^{[10][11]}。

$$\text{即 } \frac{dz}{dx} = \left(\frac{\partial Z}{\partial E} \right) \left(\frac{\partial E}{\partial X} \right) \quad (10)$$

式中右边第一项——取决于光致抗蚀剂和光刻工艺,第二项——取决于光刻设备所传递图象的光强变化。现讨论对它的影响因素。

1. 多点光源照明系统的影响

根据接近式曝光的位相错动强度叠加原理,在硅片上形成的掩模象比原狭缝略宽,由于一排光点列阵中每个光点都作出贡献,各点独立的衍射象能量错动叠加后使象宽为

$$B' = B + 2 \frac{\sum_{n=0}^n n \delta}{n} \quad (11)$$

式中 n 为除中央光点外半排光点阵的个数, δ 为两个光点在硅片上成象分开的距离, B 为掩模狭缝度, B' 为象宽

当 $B = 3$ 微米, $f = 15$ 微米, $\theta = 0.0328$ 微米。

$$\theta = 3.6^\circ, n = 5$$

$$\text{则 } B' = 3 + 2 \times 0.0986 = 3.197 \text{ 微米}$$

$$\text{光刻线宽的相对增量 } \Delta B_1 = \left(\frac{B'}{B} \right) - 1$$

$$= 0.066$$

2. 曝光不均匀性的影响

曝光视场内的照明不均匀使各芯片线宽不一致。照度均匀性取决于视场半角 θ ,由于系统杂散光影响和其它因素如汞灯位置装调误差以及总体装校误差等因素,实际曝光均匀性略大于计算值。

本机采取了在投影物镜组上加补偿板的措施使均匀性误差不大于 $\pm 2\%$,即象面上曝光量相对变化为 ± 0.02 。

按接近式光刻机的曝光量与线宽变化的关系算出若线宽 $B = 3$ 微米,当曝光量变动 12% ,则引起线宽相对变化为 10% 。

$\therefore$ 曝光照度不均匀引入的线宽相对变化量为

$$\Delta B_2 = 3.3\% = 0.03$$

3. 间隙设定精度的影响

由间隙设定的变化引入的线宽增量 ΔB_3 ,当忽略衍射部分的能量,只考虑因分离间隙使硅片象被展宽,则硅片象宽 B_1 可表示为:

$$B_1 = B + 2f \tan \theta \quad (12)$$

式中 θ 为孔径半角 $\theta = 3.6^\circ$, $f = 15$ 微米

$$\text{线宽增量为 } \Delta B = (2 \tan \theta) \Delta f$$

式中 Δf 为间隙设定重复精度; $\Delta f = 1.46$ 微米

$$\therefore \Delta B = 0.18 \text{ 微米}$$

线宽相对增量 $\Delta B_3 = 0.06$ ($B = 3$ 微米)

4. 曝光量控制精度的影响

影响曝光量变化的因素有:

恒光强控制系统的精度(经鉴定为 $\pm 1\%$);快门动作时间的变动值(≤ 35 毫秒)。曝光时间设定精度(本机采用 $f_0 = 4.8\text{KHz}$ 的石英振荡器作时基)可忽略其影响。仅计算前两项为

辐照到硅片的光能量表示为

$$Q = I \cdot T \quad (I - \text{光强}, T - \text{时间})$$

$$\therefore \Delta Q = I \Delta T + T \Delta I$$

即相对变化量为

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta T}{T} \quad (\text{设 } T = 10 \text{ 秒})$$

$$\therefore \Delta I / I = \pm 1\% = 0.02$$

$$\Delta T / T = \frac{35 \times 10^{-3}}{10} = 3.5 \times 10^{-3},$$

$$\therefore \Delta Q/Q = 0.024$$

将 $\Delta Q/Q$ 转换为线宽的相对变化量

$$\text{即 } \Delta B_4 = 0.02$$

将上述各项综合，总的线宽相对变化量为

$$\begin{aligned} \Delta B &= \sqrt{\Delta B_1^2 + \Delta B_2^2 + \Delta B_3^2 + B_4^2} \\ &= \pm 0.096 = \pm 9.6\% \end{aligned}$$

实验结果与分析结果是相符的。

从图9可见，接近式曝光使线条端部的直角变圆，（小的光刻引线方孔也变成圆孔），圆角半径经测定约为线宽的30%，这是由于复眼透镜排列布局 and 点阵相位错位引起的，说明系统消衍射能力在各个方向不一致，线宽越小，分离间隙越大则越显著。这将给图形传递质量带来不利的影响，并成为限制光刻细线条（<3微米）的因素之一。

（三）套刻精度分析

随着LSI集成度的提高，需要采用多块掩模与硅片套刻，才能完成外层图形的传递。光刻线宽日趋缩小而对套刻精度的要求越来越高。按图形传递质量的要求，套刻误

差应不大于最细线宽的1/5~1/3。图9是套刻误差的示意图。

套刻精度的影响因素有：

- 掩模与硅片的对准误差（目视瞄准或自动对准） δ 对准

- 硅片因工艺处理产生的畸变误差 δ 畸变

- 制版误差（芯片图形相邻间距差和累积误差） δ 制版

- 掩模与硅片的温度系数不同引入的线膨胀误差 δ 温差

具体分析如下：

1. 对准精度

JK-1型光刻机采用人工目视套刻。影响对准精度的因素有：

① 对准机构的调节灵敏度

采用双中心对准机构，调节X和Y、Y₂的微动手轮，实现X、Y、 θ 对准。

对准灵敏度误差

$$\Delta_1 = \frac{\Delta\theta}{360^\circ} \times t_{\text{差动}} \times 1000$$

式中： $\Delta\theta$ ——手轮最小转角感量；设 $\Delta\theta = 0.5^\circ$

$t_{\text{差动}}$ ——差动螺纹螺距； $t_{\text{差动}} = 0.1$

$$\therefore \Delta_1 = 0.14 \text{ 微米}$$

② 目视对准精度

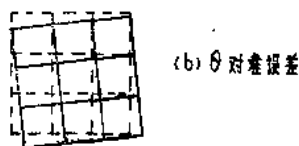
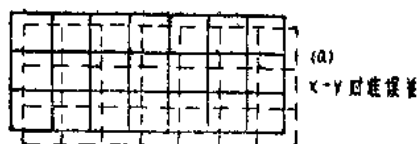
它与对准显微镜的分辨本领，放大倍率，景深，对准标志形式，对准间隙，对准图形的衬度以及操作者的瞄准分散性等设备因素和主观判断因素有关。

采用物镜NA=0.17，总倍率M为180×，目视瞄准误差（双线对中标志） ρ 取15角秒则对准误差为

$$\Delta_2 = \frac{\rho \times 250}{206265M} = 0.1 \text{ 微米}$$

③ 间隙设定机构的横向定位误差

光刻时由对准间隙转换为曝光间隙，微导向机构会产生所谓径向“漂移”，引入对准误差，本机采用双弹性簧片微导向机构，经鉴定检测横向定位（漂移）误差为 $\Delta_3 =$



图(9) 套刻误差示意图

0.2微米

④ 显微镜与曝光系统的转位重复精度

本机采用气缸驱动,使显微镜仰起 22° ,实现曝光,经检测系统转位的重复精度为 $\Delta\alpha = \pm 1'$ (角分),由此引入转位误差转换为对准误差 $\Delta_4 = 5.8 \times 10^{-3}$ 微米(由图10可见, $\Delta_4 = f \cdot \tan \Delta\alpha$)

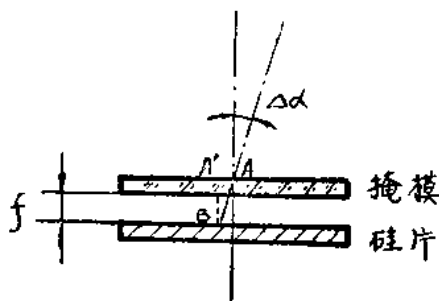


图 10 显微镜转位误差

⑤ 对准状态的显微镜光轴与掩模不垂直度

经检测,最大不垂直度为 $\Delta\alpha = 7'$ (角分)
 $\therefore \Delta_5 = f \cdot \tan \Delta\alpha \approx 0.04$ 微米($f = 15$ 微米)

⑥ 曝光状态的曝光光轴与掩模不垂直度

经检测,最大不垂直度为 $\Delta\alpha = 9'$ (角度)

同理得 $\Delta_6 = 0.05$ 微米

上述误差是互不相关的,按均方误差综合计算

$$\therefore \sigma_{\text{对准}} = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2} \\ = \pm 0.27 \text{微米}$$

此计算结果与样机考核的实际套刻测定结果是很接近的。

2. 硅片工艺处理的畸变误差

包括硅片高温工艺处理引起的畸变,对准标志轮廓对称性的变化以及显影和腐蚀等工艺因素的影响。

按经验估计, $\sigma_{\text{畸变}} = \pm 0.15$ 微米

3. 制版误差

制版设备(光学图形发生器或分步重复

精缩机)的精度决定了制版误差。设一套光刻掩模版由同一台制版设备制造,制版误差为

$$\sigma_{\text{制版}} = \pm 0.25 \text{微米}$$

4. 温度误差

① 环境温度变化引入误差

因掩模和硅片的热膨胀系数不同,温度变化 $\pm 1^\circ\text{C}$ 引入的误差为:

$$\Delta L_1 = (K_1 - K_2) \Delta T \quad (13)$$

式中: K_1 ——掩模板热膨胀系数;

$$K_1 \approx 0.08 \mu\text{m}/\text{cm}/^\circ\text{C}$$

K_2 ——硅片热膨胀系数

$$K_2 = 0.025 \mu\text{m}/\text{cm}/^\circ\text{C}$$

$$\therefore \Delta L_1 = (0.08 - 0.025) \cdot (\pm 1) \\ = \pm 0.055 \mu\text{m}/\text{cm}$$

② 曝光时掩模版受热辐射引入误差

因曝光时掩模受热辐射使掩模版温度比硅片高 0.5°C ,则:

$$\Delta L_2 = 0.08 \times 0.5 = 0.04 \mu\text{m}/\text{cm}$$

总温度误差 $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = 0.095 \mu\text{m}/\text{cm}$

本机光刻硅片直径 $\phi 50$ 毫米,双物镜工作间距为40毫米,设边缘芯片偏离对准标志的最大距离为20毫米。则引入的误差为:

$$\sigma_{\text{温度}} = 2 \cdot \Delta L = 0.19 \text{微米}$$

5. 总套刻误差

以上各项误差综合,按均方误差计算为

$$\sigma_{\text{总}} = \sqrt{\sigma_{\text{对准}}^2 + \sigma_{\text{畸变}}^2 + \sigma_{\text{制版}}^2 + \sigma_{\text{温度}}^2} \\ = \pm 0.44 \text{微米}$$

取置信概率为95%,则套刻极限误差为

$$2\sigma_{\text{总}} = \pm 0.88 \text{微米}$$

对于3微米线宽,套刻总精度为线宽的 $\pm 30\%$ 尚属合格,而对于1~1.5微米线宽(接触式光刻分辨率),则显然不匹配。对于1微米级线宽光刻,套刻精度将成为主要限制因素。除了采用自动对准技术外,提高制版精度,严格控制工艺畸变,改善工作环境的温度控制等一系列问题都要解决,才能适应微米级光刻图形传递的需要。

三、接近式光刻的局限性和应注意的问题

综上所述,光刻图形传递质量与光刻机的传递特性和总体精度,掩模和硅片的质量,光刻工艺的控制密切相关。在国内推广应用接近式光刻技术,应对这三个因素加以深入分析,并采取相应的措施。

局限性和问题

1. 光刻分辨率受光学衍射极限的制约,主要取决于曝光间隙量的大小和光刻设备的传递特性,在一般生产条件下,接近式光刻机可适应3~4微米线宽的图形传递需要,如严格控制硅片和掩模的不平度,进一步改善光刻工艺,在实验室条件下,有可能光刻2.5微米图形。

2. 由于硅片和掩模质量的限制,要实现 ≤ 2.5 微米图形的光刻还得依赖于真空接触式或投影式光刻,因此要求接近式与接触式兼容为一台设备。

3. 随着线宽缩小,对线宽控制精度和套刻精度的要求更苛刻,将成为限制接近式光刻机应用的主要因素。

4. 应采用先进的光刻工艺如自动涂胶,自动显影,干法腐蚀等稳定性好的工艺,确保图形传递质量。否则只追求光刻设备高性能指标,仍达不到预期的效果。

5. 超净的工作环境,自动传送硅片以及予对准等措施是重要的,本机采用气垫自动输送硅片和光电予定位机构,予定位精度达到 26 ± 50 微米,大大减少操作者对硅片和掩模的污染,有利于提高光刻成品率。

四、几点结论

1. 图形传递特性分析表明,实际光刻的图象对比度要比理论上所能达到的极限值为低。光刻设备、光刻工艺和硅片质量等因素的影响都十分关键。要提高图象的对比度到接近理论值则必须减小曝光间隙或牺牲0.5微米左右的光刻分辨率。

2. 在所讨论的光刻分辨率,线宽控制精度(图象线宽的相对变化量)、对准精度等几个主要问题上,理论分析与实际曝光结果和精度检测数据是符合的。

3. 分析表明,硅片不平度和掩模不平度对光刻分辨率的变化有很大影响,从工艺上采取措施,提高接近式光刻所采用的硅片和掩模版不平度是接近式光刻推广应用的关键之一。

4. 接近式光刻的局限性是存在的,但我们充分认识其规律,因势利导,有可能进一步挖掘其潜力,在中大规模集成电路(如16K电路)的光刻生产中将得到广泛的应用。

作者对郝沛明、王传贤等同志对本文的有益讨论表示感谢。微计算机程序工作是胡正保同志完成的一并致谢。

参 考 文 献

1. 郝沛明、江荣熙:“接近式光刻机复眼透镜照明系统的研究”《光学工程》,1978, No.3

2. 李灿昆:“JK—1型半自动接近式光刻机工艺试验报告”《光学工程》,1981, No.5

3. 光电所工厂检查科:“JK—1型半自动接近式光刻机总检查结果”《光学工程》,1981, No.5

4. M.C.King, M.R.Goldrick,《Optical MTF Evaluation Techniques for Microelectronic Printers》《Solid State Technology》1977, No.7

5. Makato, Nakase,《Optical MTF Evaluation for the Photolithographic Technology》《IEEE Transactions on ED》1978, ED—25, No.12

6. 堀内重治:“超LSI的微细加工技术”(日本),“电视学会志”,1979, No.11, 中译文,“半导体设备”,1980, No.2

7. 吴濯才: “接近式光刻机曝光均匀性的探讨” 《LSI制造与测试》, 1982, No. 3

8. J.H.Bruning “微细加工中的光学成象” (美) “真空科学技术”, 1980, No.5, 中译文“半导体设备” 1981, No.2

9. J.H.Bruning, T. A. Shankoff, “Far—UV 1 : 1 Projection Printing, ” “Proc. Microcircuit Eng. ” 1979, 中译文“半导体设备”, 1982, No.1

10. “日本卡诺公司来华技术座谈资料”, “接近式曝光技术”, 中译文“半导体设备”, 1979, No.1

11. Pieter, S.Burggraaf, “光刻设备的抉择” “Semiconductor International” 1981, No.4, 中译文“LSI制造与测试”, 1982, No.1

12. J.W. Goodman, “付里叶光学导论”, 詹达三等译, 科学出版社, 1976.7.

(上接第28页)

用两点连线法进行数据处理, 并求出其均方根误差 σ 。

测量结果:

水平方向: $3\sigma = 0.4''$

垂直方向: $3\sigma = 0.55''$

几点结论:

(1) 用本文计算方法和公式设计的LAB—150闭式平面气浮导轨比较实测及理论计算结果基本是一致的, 这说明了用假定中心为恒压区, 边缘用积分法的计算方法进行计算在工程实际设计中是可行的, 这是一种简易的办法。

(2) 导轨的极限承载能力随供气压力增加而增加, 刚度随供压增加而增大, 随着间隙的减小而增大。

(3) 流量随供压增加而增大, 随间隙减小而迅速减小。实际使用时, 供压与流量必须匹配。如果流量小, 气体经过节流后, 流入导轨间隙的压力要有损失, 实测读数(如承载能力)偏低。

(4) 供压一定, 导轨浮起位置的变化随着外载的增加而减小; 外载一定, 浮起位置变化随供气压力增加而增加。

(5) 闭式平面气浮导轨是一种高精度的直线运动空气轴承, 如果设计合理, 工艺能保证加工精度, 其直线运动精度可达亚微米级或毫微米级。用它做为超微细加工、超精密切削加工或超精密测量的工件台装置是特别优秀的。本文所综述的LAB—150闭式平面气浮导轨, 做为1:1扫描投影光刻机扫描架的实验导轨, 就其实测承载能力、刚度和直线运动精度等技术指标来看, 满足了光刻机的使用要求, 是一种非常有前途的导轨。

参 考 文 献

(1) J.W.Powell, “Design of Aerostatic Bearing” 78年

(2) 机床译丛, 1965.9 P9 “空气静压导轨计算”

国外分步重复投影光刻机(DSW系统)动态

毕平真

(科学院光电所)

摘 要

本文介绍了近年来国外投影光刻设备的进展情况,并着重介绍了分步重复投影光刻机(DSW)的情况,并与其他类型的投影光刻机作了比较。在此基础上分析了DSW系统的发展趋势。

目前,以64K、256K RAM为代表的VLSI已批量生产。其核心技术——光刻正在显著进展;因而作为核心技术的设备也在不断地发展,其中尤以DSW系统更引人注目。

一、国外分步重复投影光刻机(DSW)系统情况介绍

由于光学光刻可以使用现有的工艺或人们已熟知的工艺,因此希望此种技术的使用时间越长越好。许多人认为“整个八十年代将仍以光学光刻为主”。本文就此观点出发,着重介绍光学光刻设备的主流—DSW系统的发展情况和趋势。

投影光刻机主要有两种类型:一是1973年出现1:1扫描反射投影式光刻机,以美国Perkin—Elmer公司的Micralign 500为代表,二是,1978年问世的,以美国GCA公司Mann 4800 DSW为代表的分步重复缩小投影式光刻机。前者以生产率高著称(每小时可曝光 $\phi 125\text{mm}$ 片子100枚),后者以分辨率高著称($1\sim 2\mu\text{m}$)。

据美国IBM公司的Broese讲,目前他们在半导体生产线上普遍使用1:1扫描反射投影式光刻,使用最多的是Perkin—Elmer公司的1:1扫描反射投影式光刻机,主要用于

MOS电路。它已研制了三代该类型的产品,即100, 200和500系列。目前该公司已宣布它的500型具有处理 $\phi 150\text{mm}$ 片子的能力。它的特点是精密自动对准和倍率补偿。该装置在使用紫外或远紫外光作扫描式一次曝光方面并没有变化,但分辨率已大幅度提高($0.9\sim 1.2\mu\text{m}$)。日本的Canon公司也研制了1:1反射投影式光刻机(紫外与远紫外)。它的新系统MPA—500FAB光刻机除光刻 $\phi 150\text{mm}$ 硅片能力之外,套刻精度大大提高。新系统的特点是将投影光学系统与扫描机构密封在一个恒温室中,从而大大提高了系统的稳定性。

Mann 4800DSW系统自GCA公司研制成功到目前为止,已销售了几百台,用于 $3\sim 2\mu\text{m}$ 几何尺寸生产。现已发展成6000系列,被称之为“半导体工业中最有意义的工艺设备”,受到人们的欢迎。欧洲、日本等也都在此基础上成功地研制了DSW系统。

DSW系统产生背景

1:1扫描反射投影式系统虽然具有成本低、产量高、系统维护与操作性能好等优点,但它毕竟有局限性,由于畸变是个大问题,因而不能无条件地使用到 $2\mu\text{m}$ 的LSI批量生产中。

美国Optimetrix公司研究与发展付会长

表1 两种新型的1:1扫描反射投影式光刻机比较

规格	Perkin-Elmer (美国)	Canon(日本)
型号	500型	MPA-500FAB
分辨率(μm)	0.9(波长260nm)	
	1.0(波长300nm)	1.0(远紫外波段)
	1.25(波长400nm)	1.5(紫外波段)
焦深(μm)	$\pm 6(1.5\mu\text{m}$ 线距)	$\pm 6(1.5\mu\text{m}$ 线距)
光学畸变(μm)	$\pm 0.25(98\%)$	$\pm 0.3(3\sigma)$
对准转度(μm)	$\pm 0.25(98\%)$	$\pm 0.45(3\sigma)$
产量(枚/小时)	100(125mm)	80(125mm)

Jim Dey说:“对尺寸和套刻精度的控制,需要制造分步重复投影光刻机以便生产先进的高集成度半导体器件”。在用什么光源都难以解决套刻问题的情况下,就促使人们用激光干涉仪控制工作台步进成像方法,改变硅片上芯片的分布。于是,七十年代后期,GCA公司研制成功的第一台Mann4800DSW问世了。

DSW系统发展情况

第一代机器具有一次硅片对准能力的分步重复相机的改型。这一代是从1978年,GCA公司的4800DSW进入市场开始的。

第二代分步重复光刻机的含义是全自动对准,30枚/小时的产量,能进行混合匹配对准,1—2 μm 工作分辨率和 ± 0.4 —0.6 μm (2 σ)机—机的套刻精度。

第三代分步重复光刻机尚不清楚。一般说来,其特点是同轴对准,真正适用于1 μm 分辨率,40—60枚/小时的生产率(制造厂给定),逐场对准, ± 0.25 — $\pm 0.40\mu\text{m}$ (2 σ)的机—机的套刻精度。第三代分步重复光刻机的重要特点是为减少硅片处理所引起污染的光刻胶涂复—显影系统的一体化。

七十年代后期,GCA公司开始生产4800DSW的一段时间内,美、日等其他公司还不能提出相应的产品,但从80年下半年开始,相继发表了新的实用产品,开始了设备

市场的竞争。尤其是缩小倍率从原来的10:1增加到新的5:1,并采用了自动化装置以提高效率。

在美国,GCA的主要竞争者是三个加州的公司:Electromask、Optimetrix和Ultratech。其中以Electromask公司为最强。它的700SLR(后出现的TRE 800SLR为前者的缩小型)有10 $\times$ 镜头系统,工作台用激光干涉仪控制,分辨率取决于视场大小可达1—1.25 μm ,可处理3英寸、4英寸和5英寸硅片。它也备有5 $\times$ 镜头。Optimetrix的10 $\times$ 分步重复投影光刻机8010型,是全自动的同轴对准系统;它的1:1分步重复光刻机8001型,38mm²视场的分辨率为1.5 μm 、对准精度为1.5 μm 。生产率为60—100枚/小时。Ultratech的900型是GCA Mann 4800DSW的另一竞争对手,是自动对准的。图1为Optimetrix的8010。

另外,在日本和欧洲,分步重复投影光刻机的厂商也在和美国竞争。上述提到的Canon的FPA-112FA和MPA-520FAB以及新的5:1系统FPA-1500FA,Nikon有NSR系列(NSR-1010G、1505G、2005G),Hitachi的RA-101是10:1 DSW系统。在欧洲,荷兰Philips公司有一改进的SIRE-3,为5:1 DSW系统以及列支敦士登Censor公司的10:1系统SRA-100和新的SRA-200,它们为自动聚焦、自动对准系统。法国Thomson-CSF公司也有分步重复光刻机。

GCA公司的6000系列包括6100高生产率系统、6200实验室系统和6300全自动系统。8000系列和4800系列的完全不同:逐场对准,具有自动的中间版变换装置,从10盒中间版中自动选择和对准、自动调平硅片和硅片自动对准系统。6300A的生产率提高主要是高速工件台和Maximus1000照明器的使用。采用这样的全自动系统,硅片的生产率提高了25%,例如可达60枚/小时4英寸或