

文章编号: 1001-4322(2000)05-0559-06

# 软 X 射线投影光刻技术

金春水, 王占山, 曹健林

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

**摘 要:** 软 X 射线投影光刻作为特征线宽小于 $0.1\mu\text{m}$  的集成电路制造技术, 倍受日美两个集成电路制造设备生产大国重视。随着用于软 X 射线投影光刻的无污染激光等离子体光源、高分辨率大视场投影光学系统、无应力光学装调工艺、深亚纳米级镜面加工和多层膜制备、低缺陷反射式掩模、表面成像光刻胶、精密扫描机构等关键技术均取得了突破。

**关键词:** 软 X 射线; 投影光刻; 集成电路

**中图分类号:** O434.14 **文献标识码:** A

在信息时代, 用于集成电路生产的光刻技术倍受日美等集成电路制造设备生产大国的重视。光刻技术的发展经历了等倍光刻到投影微缩光刻, 使用的波长亦在逐渐趋短, 从 g 线(436nm)到 i 线(365nm)及准分子激光 KrF(248nm)和 ArF(193nm)。随着光源工作波长的逐渐缩短及相移掩模和离轴照明等新技术的引入, 现有的可见-紫外光刻技术也可以用来制造线宽为 $0.18\mu\text{m}$ 、集成度为1Gbit 的 DRAM, 而要制造线宽小于 $0.1\mu\text{m}$ 、集成度大于16 Gbit 的 DRAM, 软 X 射线投影光刻技术是众多方案中最有前途的。

软 X 射线投影光刻技术是现有可见-近紫外投影光刻技术向软 X 射线波段(1~30nm)的延伸。但是, 由于此波段任何材料的折射率均接近于1, 而且吸收较大, 微缩投影光学系统必须采用反射系统, 而单层膜反射镜对正入射软 X 射线的反射率几乎为零, 无法利用其组成正入射系统。70年代后, 随着超光滑表面加工技术和超薄膜制备技术的不断提高, 目前人们制备的13nm Mo/Si 多层膜反射率已接近70%。这使人们利用多层膜反射镜集成软 X 射线投影光刻系统成为可能。

从1984年起, 日本 NTT、Nikon、日立等大公司先后开展了软 X 射线投影光刻技术研究。1992年, NTT 研制成带有扫描机构的样机, 可在 $10\text{mm} \times 12.5\text{mm}$  硅片上复制线宽达 $0.15\mu\text{m}$  的图形<sup>[1]</sup>。1993年至1994年, 日立和 Nikon 公司先后实现了 $0.05\mu\text{m}$  线宽的光刻复制。1995年, 美国 Sandia 国家实验室利用已建成的实验装置完成了线宽为 $0.1\mu\text{m}$  门电路(NMOS)的制作<sup>[2]</sup>。1996年起, 国际上开始产、学、研联合攻关, 计划2004年完成设备研制和工艺研究, 到2007年将制造 DRAM 容量为16Gbit、特征线宽 $0.1\mu\text{m}$  的软 X 射线投影光刻设备工业生产。

## 1 软 X 射线投影光刻系统的概述及最小刻划线宽

由图1所示, 未来软 X 射线投影光刻设备由激光等离子体光源、照明光学系统、微缩投影光学系统、掩模及硅片精密工作台、减震系统及相应的真空室组成<sup>[3]</sup>。微缩投影光学系统是由二块或三块非球面镜组成的反射式光学系统。此时, 像差最小区域是以光轴为中心的圆环, 为获得足够的光刻范围, 必须使反射式掩模和硅片作同步扫描。在结构上, 微缩投影光学系统为像方远心光路, 以免焦深范围内的倍率变化。为提高系统光能量效率, 各多层膜系的带宽须严格匹配。

微缩光学系统理论分辨率  $d$  由 Fraunhofer 公式、系统焦深  $f_d$  由 Rayleigh 公式给出

$$d = k_1 \lambda / N_A, \quad f_d = k_2 \lambda / N_A^2 \quad (1)$$

其中,  $\lambda$  为系统工作波长,  $N_A$  为像方数值孔径,  $k_1, k_2$  为与工艺有关的常数, 通常均为0.5。由理论分辨率

收稿日期: 1999-07-28; 修订日期: 2000-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(69625710)

作者简介: 金春水, 男, 1964年10月出生, 副研究员, 博士在读, 从事光学仪器总体与软 X 射线投影光核系统研究。

$d$  表达式, 欲提高系统分辨率或减小最小刻划线宽, 可减小系统工作波长和增大数值孔径。但从系统焦深表达式  $f_d$  可知, 减小工作波长和增大数值孔径也会使焦深变小, 不利于光刻系统的调整。为此, 必须在系统分辨率与焦深间折衷, 使焦深  $1\mu\text{m}$ , 以便硅片对准和调整。

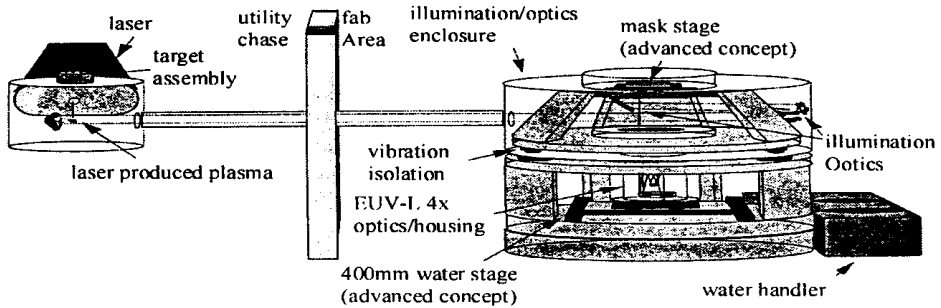


Fig 1 Concept of commercial SXPL tool

图1 商用软 X 射线投影光刻设备

## 2 软 X 射线投影光刻关键技术研究的现状

软 X 射线投影光刻技术由于工作波长短, 目前尚有许多关键技术问题需要解决。

### 2.1 光源技术

在软 X 射线投影光刻的光源中, 激光等离子体光源(LPS)比同步辐射源(SR)体积小、价格便宜、易于在现有集成电路生产线上安装。但常规激光等离子体光源在激光直接照射在固体靶上时, 除辐射出所需软 X 射线外, 还产生大量的碎屑(debris), 会污染并缩短光学元件的寿命。为此, 实用化的光刻系统必须使用无污染的激光等离子体光源。

在低碎屑激光等离子体软 X 射光源研究初期, 主要是设法减少金属靶光源所产生的碎屑对软 X 射线光学元件的影响。一是减少碎屑产生, 二是设法阻止碎屑到达软 X 射线光学元件表面而减少对元件的影响。经常采用机械斩片法、质量限制法和充气阻截法<sup>[4]</sup>。近年来, 人们尝试用气体冷冻靶(如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、Xe 等)消除碎屑<sup>[5]</sup>。但这种光源的光斑空间位置稳定性差, 很难与高质量的聚光系统相匹配; 同时未经气化的飞溅粒子仍可能损伤多层膜。

美国 Sandia 国家实验室发展了气体喷射靶等离子体光源技术, 以适应软 X 射线投影光刻系统要求<sup>[6]</sup>。这种光源以喷嘴向真空中喷出的脉冲状高密度气体为靶体, 虽然其转换效率较低, 但因完全消除了对光学元件污染, 可使聚光系统长期工作, 而且可保证高精度光斑空间位置, 有望发展为实用光源。

### 2.2 软 X 射线微缩投影光学系统

目前, 软 X 射线多层膜反射率在  $11\sim 14\text{nm}$  波段为最高, 但只接近 70%, 因此光学设计时应尽量减少反射镜数目。迄今, 软 X 射线微缩投影光学系统多采用二块非球面结构。近年来, 随着多层膜反射率及光源强度提高, 开始设计三块非球面镜的光学系统, 以提高微缩投影光学系统的视场<sup>[7]</sup>。

软 X 射线投影光刻系统为了实现近衍射极限性能的分辨率, 微缩投影光学系统的 RMS 波像差应小于工作波长的  $1/14$ 。此时分配到每个光学元件的面形精度  $\delta_v$ 、 $\delta_{\text{RMS}}$  一般由 Rayleigh 公式和 Marechal 公式分别给出。

$$\delta_v = \lambda/4\pi, \quad \delta_{\text{RMS}} = \lambda/28n^{1/2} \quad (2)$$

$n$  为光学系统的镜面数,  $\lambda$  为系统工作波长。对于三块非球面组成的微缩投影光学系统, 为在  $13\text{nm}$  波长处达到衍射极限, 每一反射面的面形精度  $\delta_v < 1\text{nm}$ ,  $\delta_{\text{RMS}} < 0.28\text{nm}$ 。

光学元件表面粗糙度是影响多层膜反射率和光学系统质量的因素之一。假定表(界)面粗糙度服从高斯分布, 则表面粗糙度对反射率影响可用 Debye-Waller 因子表征

$$R = R_0 \exp \left[ - \left( \frac{4\pi Q_{\text{RMS}} \sin \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$R$  与  $R_0$  分别为实际和理想表(界)面的反射率,  $\sigma_{RMS}$  为表(界)面粗糙度,  $\varphi$  为掠入射角,  $\lambda$  为入射光波的波长。若要求表(界)面的散射损失 10%, 其粗糙度  $\sigma_{RMS} < \lambda/40$ , 至少要达深亚纳米。深入研究表明, 与不同空间频率对应的表面起伏变化(粗糙度)对入射光波散射后造成的影响不同。空间频率对应于  $10^3 \text{mm}^{-1}$  以上的高频粗糙度, 引起入射光波的广角散射, 虽影响多层膜的反射率, 但不影响成像质量。而空间频率为  $1 \sim 10^3 \text{mm}^{-1}$  的中频波纹度引起入射光波的小角散射, 对光学系统成像影响较严重。这类表面波纹度应控制在  $0.2 \text{nm}$  以下。

对上述面形精度、中频波纹度和高频粗糙度可分别采用相移干涉仪、WYKO 轮廓仪(或 Talystep)和原子力显微镜进行检测。图2反映了软 X 射线投影光刻用反射镜的表面精度及现状<sup>[8]</sup>。

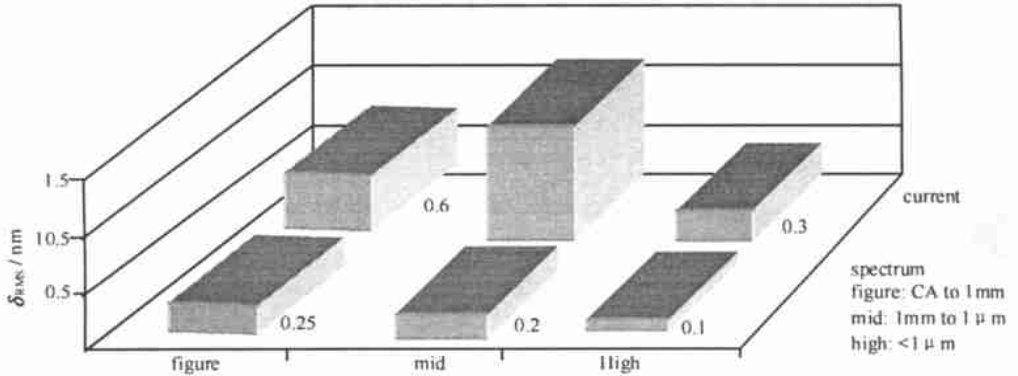


Fig. 2 The accuracy of mirrors required by SXPL and current status

图2 软 X 射线投影光刻系统对光学元件加工精度的要求及目前的精度

软 X 射线投影光刻系统的最后波差要达到  $\lambda/14$  ( $0.95 \text{nm}$ ), 因此光学元件装配应采用无应力装调<sup>[9]</sup>, 以消除装配应力引起元件面形变化, 满足系统波差要求。

### 2.3 反射式掩模

软 X 射线投影光刻掩模是制备在多层膜上的反射式掩模。由于有微缩光学系统, 它较大的特征尺寸; 同时它在它制备的镀有多层膜的较结实基片上, 能避免软 X 射线照射引起的掩模热变形, 便于实现高精度的光刻复制。目前, 反射式掩模一种是在多层膜上添加重金属 (W、Ta 等) 吸收体的添加型 (additive), 另一种是在多层膜上去除不需要的多层膜的去成型 (subtractive)。前者是目前公认较好的方法, 它除了可以获得较高的反射衬度, 特别利于掩模缺陷的修复。后一种方法能够达到很高的衬度, 但无法进行掩模缺陷的修补。软 X 射线投影光刻用反射掩模要求其反射部分的反射率大于 60%, 缺陷的密度小于  $0.1$  个/ $\text{cm}^2$ 。实验表明, 小于掩模最小线宽  $1/6$  的缺陷对最后成像结果没有影响<sup>[10]</sup>, 这是缺陷的最大允许尺寸。目前, 人们已制备出反射率大于 60%、缺陷密度小于  $0.03$  个/ $\text{cm}^2$  的反射掩模。

### 2.4 软 X 射线多层膜技术

软 X 射线多层膜可以看作晶格常数(多层膜周期膜厚)为纳米量级的一维人工类晶体。它是将折射率差异大、吸收小的两种材料交替沉积在超光滑的基板上制成的。多层膜峰值反射率波长可用修正的 Bragg 公式表示

$$\lambda = 2d [\sin\theta - (1 - n)/\sin\theta] \tag{4}$$

$d$  为周期膜厚,  $\theta$  为软 X 射线掠入射角,  $n$  为一个周期内的折射率平均值。

多层膜制备主要有电子束蒸发和溅射方法两类。电子束蒸发法是利用高能电子束气化待镀材料, 使其沉积到基板上, 其真空度高(超高真空镀膜机  $p < 10^{-6} \text{Pa}$ ), 特别适于蒸镀易氧化材料。但此法产生的蒸镀粒子动能较小, 膜系疏松, 实现稳定的镀膜速率控制较难。溅射法分离子束溅射和磁控溅射, 它用气体离子将被镀材料溅射沉积到基板上。此法产生的溅射粒子的动能较大, 在基板上堆积紧密, 膜系密度较大; 此外, 溅射过程容易控制, 能得到稳定的镀膜速率。目前, 用于软 X 射线投影光刻的多层膜大都用溅射镀膜法制成。软 X 射线投影光刻使用的多层膜要求在较大的面积上获得高且均匀的反射率, 因而

镀制在曲面基板上的多层膜,应根据入射角度变化调整多层膜周期厚度<sup>[11]</sup>。此外,多层膜还应具有最小应力,使膜层应力不对镜面面形产生影响。

## 2.5 光刻胶技术

在光刻系统中,光刻胶的好坏直接影响着生产效能。软 X 射线投影光刻系统的光刻胶应具有小于  $0.1\mu\text{m}$  的分辨本领及  $20\text{mJ}/\text{cm}^2$  感光度,大于  $0.5\mu\text{m}$  抗蚀蚀能力和  $85^\circ$  的侧壁倾角。传统的光刻胶 PMMA 具有极高的分辨本领,但感光度极低,通常为  $60\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。近年采用的具有化学增强作用的光刻胶,如美国 Sharp lan Lasers 公司的 SAL-601,在分辨率和感光度上都适于软 X 射线投影光刻,在  $13\text{nm}$  波长处的感光度达  $1.3\text{mJ}/\text{cm}^2$ ,并在对比度及光刻图形边缘光滑特性等方面均优于传统的高分子光刻胶 PMMA。但光刻胶对  $13\text{nm}$  波长的辐射吸收较大,曝光深度仅为  $0.2\mu\text{m}$ ,作为单层结构使用时,如此薄的光刻图形不利于后续刻蚀。为此,必须采用新的光刻胶技术。

近年来,利用光刻胶表面潜影,采用后续刻蚀工艺,解决单层光刻胶刻蚀能力低的问题。三层光刻胶结构作为表面成像技术之一,已被 Sindhia 实验室用于软 X 射线投影光刻,制备出线宽为  $0.1\mu\text{m}$  的 NMOS<sup>[5]</sup>。它采用离子束刻蚀工艺将最上层的 SAL-601 曝光显影后的图形转移到硅片上,虽然解决了抗蚀性,但工艺十分复杂,目前主要适用于器件试制。最可能采用的光刻胶技术是用硅烷化反应的全新表面成像技术<sup>[12]</sup>,其光刻胶是单层结构。它首先利用硅烷化剂处理光刻后的抗蚀剂表面,此时非光刻部分将形成硅氧烷结构,然后利用反应氧离子刻蚀(O<sub>2</sub>RIE)进一步处理光刻部分。为提高此种处理工艺的尺寸控制性,应使硅烷化层尽可能薄,并抑制其横向扩散。这样,光刻胶处理技术在分辨本领、抗蚀能力、侧壁倾角和感光度等方面表现出巨大潜力,有望近期发展为实用的光刻胶技术。

## 2.6 精密扫描机构及对准技术

软 X 射线投影光刻系统要获得大的光刻范围,必须使掩模和硅片同步扫描。同步扫描时,通常要求掩模和硅片对准精度为光刻特征线宽的  $1/4\sim 1/5$ ,对  $0.1\mu\text{m}$  特征线宽光刻系统,对准精度要小于  $0.025\mu\text{m}$ ,这对扫描及对准机构精度提出了极高要求。光刻系统在真空环境工作,其扫描机构除需减小振动和传动装置的热量、提高同步扫描控制精度外,还须采用可在真空环境工作的精密导向机构。目前,可在真空中工作的精密导向机构是磁浮机构。相比传统的导向机构,它无摩擦、不产生粉尘、不需润滑、相对容易制造,并且功耗低。美国的 Sindhia 实验室已制成用于投影光刻实验装置的磁悬浮工作台,稳定性达  $5\text{mm}(3\sigma)$ <sup>[13]</sup>。

掩模和硅片步进扫描时采用可见光莫尔条纹技术来对准。它是将形成莫尔条纹所需的光栅刻到掩模和硅片的边缘,然后通过投影物镜将掩模上的光栅成像到硅片上,将这两个合成图像成像在一个带十字丝的像面上,最后利用 CCD 相机接收上述像面的像。目前在  $x$ 、 $y$  轴方向均可达到  $10\sim 15\text{nm}$  的对准精度 ( $3\sigma$ )<sup>[13]</sup>。

为保证工作台的硅片能在系统焦深范围内,需要在垂直于硅片方向进行调整。目前,已建成的光刻系统采用了掠入射自动调焦系统,其焦面调整精度为  $\pm 0.15\mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>,焦深通常为  $\pm 1\mu\text{m}$ ,能满足软 X 射线投影光刻的调整精度。

## 3 我国的软 X 射线投影光刻关键技术的进展

始于70年代末的我国软 X 射线光学技术研究涉及软 X 射线光源、软 X 射线辐射计量、超精密光学加工/检测和软 X 射线多层膜技术等。在作为主要技术基础的软 X 射线成像光学方面,长春光机所居国内领先。近年在投影光刻的关键技术及系统集成上有了重要进展。

### 3.1 软 X 射线激光等离子体光源

长春光机所开展了无污染软 X 射线投影光刻用激光等离子体光源技术研究。先后研制出  $\text{CO}_2$  冷冻靶及气体靶激光等离子体软 X 射线光源,在软 X 射线投影光刻工作波段 ( $13\text{nm}$ ) 测得了较强的辐射<sup>[14]</sup>。

### 3.2 软 X 射线多层膜技术

在软 X 射线多层膜元件研制中,镀膜材料光学常数是所有计算和设计的基础。在膜厚为纳米量级情况下,镀膜材料的光学常数既是波长函数,也是膜厚函数。B. L. Henke 等人利用测光吸收定出原子

散射因子计算的光学常数和 D. L. Windt 等人利用反射率方法测量的光学常数都对应块材料或较厚的膜 ( $d > 100\text{nm}$ ), 而软 X 射线多层膜的膜厚一般都小于  $10\text{nm}$ 。积累超薄膜状态下的软 X 射线波段光学常数已成为研究的一个迫切需要。长春光机所与日本东北大学科学计测所合作, 精确地测定  $60\sim 900\text{eV}$  之间 Au, C, Mo, Rh, Ru, Pt, W, Si 等物质的光学常数<sup>[15]</sup>。

软 X 射线多层膜系设计需解决两个中心问题, 一是选择镀膜材料; 二是在给定材料、使用条件后, 决定膜系所能达到的最大反射率和与此对应的各层最佳膜厚值。为此, 我们发展了一种称为“复平面光滑连接作图法”的设计, 解决了膜系设计的两个关键问题。与通常的迭代计算方法相比, 这种方法计算简单、物理图像直观清晰。同时还编制了一套完整的设计程序和模拟计算程序。1990年起主持研制了国内首台离子束溅射镀膜机 (BS) 和磁控与离子束溅射复合镀膜机 (MS)。经大量实验已找到较佳参数, 膜厚控制精度优于  $0.1\text{nm}$ 。在  $13\text{nm}$  波段, 利用磁控溅射法已制备出正入射反射率达  $50\%$  的 Mo/Si 多层膜。

### 3.3 浮法抛光超光滑表面加工技术

超光滑基板是制备软 X 射线多层膜的基础, 而传统光学加工难以做到表面粗糙度小于  $0.5\text{nm}$ 。1992年起长春光机所开始研究浮法抛光技术, 经一年多努力, 以锡磨盘的浸液抛光新工艺研制出浮法抛光机原理实验样机。经工艺实验平面样品表面粗糙度小于  $0.3\text{nm}$ <sup>[16]</sup>。

### 3.4 软 X 射线正入射成像系统

从 1991年起开始研制  $18.2\text{nm}$  Schwartzschild 型软 X 射线显微镜。它由软 X 射线激光等离子体光源、镀有多层膜的球面聚光镜、 $10\times$  Schwartzschild 显微物镜、A1/C 软 X 射线滤光片组成, 实现小于  $1\mu\text{m}$  的空间分辨率。在软 X 射线正入射显微成像系统研究基础上, 设计了工作波长  $13\text{nm}$  的软 X 射线投影光刻原理装置<sup>[17]</sup>, 它由软 X 射线激光等离子体光源、椭球聚光镜、透射式掩模、 $0.1\times$  Schwartzschild 显微成像系统、掩模和硅片精密工作台组成。现已制成多层膜光学基板, 即将安装调试。分辨率有望达到小于  $0.25\mu\text{m}$ 。

## 4 结束语

目前, 软 X 射线投影光刻技术仍需解决许多关键技术, 尤其是深亚纳米级镜面加工和多层膜制备技术。然而, 技术路线与解决问题途径也基本明确。因此, 在本世纪初完全可以期待用软 X 射线投影光刻技术批量生产出特征线宽小于  $0.1\mu\text{m}$  的集成电路。

## 参考文献:

- [1] 木下博雄, 栗原健二. X 射线投影光刻技术[J]. *NTT R&D*, 1994, **43**(11): 1221~ 1228
- [2] Nguyen K B, Cardinale G F, Tichner D A, et al. Fabrication of Metal-oxide-semiconductor Devices with Extreme Ultraviolet lithography[J]. *J Vac Sci Technol*, 1996, **B14**(6): 4188~ 4192
- [3] Tichenor D A, Kubiak G D, Haney S J, et al. Recent results in development of an integrated EUVL laboratory tool[A]. *Proc SPIE [C]*, 1995, **2437**: 292~ 307.
- [4] Kandaka N, Kondo H. Effective reduction of debris emitted from a laser produced plasma[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1998, **37**(2): 174~ 176
- [5] Kubiak G D, Krenz K D, Berger K W. Cryogenic Pallet laser Plasma Source Targets[A]. *OSA Proceeding on EUVL [C]*, 1994, **23**: 248~ 254
- [6] Kubiak G D, Bernardez L J, Krenz K. High-power Extreme Ultraviolet Source Based on Gas Jets[A]. *Proc SPIE [C]*, 1998, **3331**: 81~ 89
- [7] Kinoshita H, Watanabe T, Niibe M, et al. 3-spherical System for EUVL Lithography[A]. *Proc SPIE [C]*, 1998, **3331**: 20~ 30
- [8] Bajuk D, Kestnet R. Fabrication and Testing of EUVL Optics[A]. *JSPE Proceedings of the 2nd US-Japan Workshop on soft X-ray Optics [A]*, Yamnak-ko, Japan, 1997: 325~ 335
- [9] Stulen R H. Overview of US milestone program and integrating and EUVL laboratory tool[A]. *JSPE Proceedings of the Second US-Japan Workshop on soft X-ray Optics [C]*, Yamnak-ko, Japan, 1997: 5~ 23
- [10] Nguyen K B, Mizota T, Haga T, et al. Imaging of extreme ultraviolet lithographic masks with programmed substrate defects[J]. *J Vac Technol*, 1994, **B12**(6): 3833~ 3840
- [11] Windt D L, Wasikiewicz W K. Multilayer facilities required for extreme ultraviolet lithography[J]. *J Vac Sci Technol*, 1994, **B12**(6):

3826~ 3832

- [12] Peckerar M. Surface imaging for EUVL for lithography[A]. JSPE Proceedings of the 2nd U S-Japan Workshop on Soft X-ray Optics [C], Namikawa H, Ito K eds. Yamnako, Japan, 1996
- [13] Hguyen K B, Tichenor D A, Berger K W, et al. Characterization of the alignment on a laboratory extreme ultraviolet lithography tool [A]. Proc SPIE[C], 1996, **2723**: 54~ 62
- [14] 林景全. 低碎屑激光等离子体软 X 射线源研究[D]. 中科院长春光机所. 1999.
- [15] 曹健林. 软 X 射线光学常数测定及多层膜反射镜设计、制备[D]. 中科院长春光机所. 1989.
- [16] 高宏刚. 亚纳米量级光滑表面的超精密抛光[J]. 仪器仪表学报, 1997, **18**(1): 75~ 79.
- [17] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J]. 光学精密工程, 2000, **8**(1): 66~ 70.

## Soft X-ray Projection Lithography Technology

J N Chun-shui, WANG Zhan-shan, CAO Jian-lin

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

**ABSTRACT:** Soft X-ray projection lithography is expected as a candidate for VLSI production in the near future. Based on such background, soft X-ray projection lithography (SXPL) technology is being extensively studied in several countries, especially in Japan and USA, which are the main offers of microelectronic integrated circuits and its fabrication facilities. Those researches have made important progress in the major areas of SXPL, like debris free laser produced plasma source, design of high resolution and large field projection system, super precision mirror/substrate polishing and coating, low defect reflective masks, surface-imaging resist, and super fine scan stage, etc. Along the same thought, therefore, the authors and their colleagues have concentrated in SXPL researches in the recent years, and obtained a series of results.

**KEY WORDS:** soft X-ray; projection lithography; integrated circuits