

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0852-06

极紫外投影光刻原理装置的集成研究*

金春水 马月英 裴 舒 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: 论述了光刻技术发展的历程、趋势和极紫外投影光刻技术的特性, 并介绍了极紫外投影光刻原理装置的研制工作。该装置由激光等离子体光源、掠入射椭球聚光镜、透射掩模、施瓦茨微缩投影物镜及相应的真空系统组成。其工作波长为 13 nm, 在直径为 0.1 mm 的像方视场内设计分辨率优于 0.1 μm 。

关键词: 极紫外; 极紫外投影光刻; 多层膜反射镜; Schwarzschild 物镜

中图分类号: TN23 文献标识码: A

1 引 言

集成电路制造技术是电子信息 and 众多相关产业发展的基础, 也是推动整个国民经济和国防现代化建设的关键性因素之一。而在集成电路制造技术中, 最关键的就是决定集成电路元件特征尺寸(线宽)的光刻技术。

图 1 为集成电路发展水平标志的代表性器件——动态随机存储器(DRAM)及光刻技术的发展历程和趋势^[1]。从技术上, 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(436 nm)、i 线(365 nm)、KrF(248 nm)、ArF(193 nm)和 F₂(157 nm)及极紫外。目前进行商业开发的 F₂ 光刻设备, 在采用相移掩模和离轴照明等技术后, 可用来制造线宽达 0.07 μm 、容量达 64 Gbit 的动态随机存储器; 极紫外投影光刻(EUVL)技术适于复制线宽为 0.1 μm ~0.03 μm 、集成度为 16 Gbit~1024 Gbit 的数代集成电路。

极紫外是波长为 10 nm~200 nm 的电磁辐射。在波长短于 30 nm 的极紫外波段内, 任何材料的折射率均接近于 1, 而且吸收较大, 光学系统采用反射形式是其显著的特征, 但利用单层膜反射镜已无法组成正入射系统。20 世纪 80 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, 人们制备的多层膜反射镜已可以在 11 nm~14 nm 波段获得较高的正入射反射率。例如, Mo-Si 多层膜在 13 nm 处反射率大于 66%^[2]; 在更短的波长

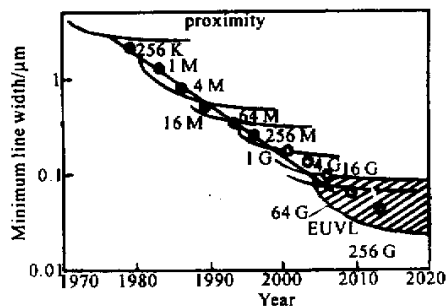


Fig. 1 DRAM and lithography trend

11.4 nm, Mo-Be 多层膜反射率达到 68.70%^[3]。由于波长更短, 可获得更高的衍射分辨率, 同时可满足必要的焦深要求。例如, 数值孔径为 0.1、工作波长为 13 nm 时, 可获得 0.065 μm 的分辨率和大于 1 μm 的焦深。

为了实现小于 0.1 μm 的复制线宽及宽度大于 1 mm 的环形曝光区域, 极紫外微缩投影光学系统必须采用面形精度和表面粗糙度达深亚纳米量级的非球面^[4,5]。但是, 目前我们的非球面加工精度还无法达到深亚纳米量级, 选用同心球面施瓦茨(Schwarzschild)结构^[6]进行极紫外投影光刻原理及集成技术的研究是比较切实可行的方案。

2 极紫外投影光刻原理装置概述

图 2 为极紫外投影光刻原理装置结构。激光等离子体光源由脉冲输出能量为 1 J、重复频率为 10 Hz、脉冲宽度为 10 ns 的 1.06 μm YAG 激光器及聚光镜和旋转的金属铜靶组成。YAG 激光束通过焦距为 200 mm 的聚光镜会聚成 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的光斑轰击铜靶。激光轰击铜靶时, 除产生所需的 13 nm

* 国家自然科学基金(699380201)资助课题。

E-mail: jincs@sklao.ac.cn

收稿日期: 2001-06-25; 收到修改稿日期: 2001-09-17

辐射外,还发出许多对光学反射镜有污染的激光等离子体“碎片”,同时使靶体被轰击处产生凹陷。为了获得稳定的极紫外辐射,激光等离子体光源的靶体根据激光脉冲的重复频率,以一定的转速旋转。激光等离子体光源产生的极紫外射线通过掠入射椭球聚光镜照明透射掩模,然后被照明的掩模通过施瓦茨投影物镜在涂有光刻胶的硅片上形成微缩10倍的掩模像。光刻胶为PMMA,厚度为 $0.18\ \mu\text{m}$ 。真空系统的真空度为 $10^{-4}\ \text{Pa}$ 。

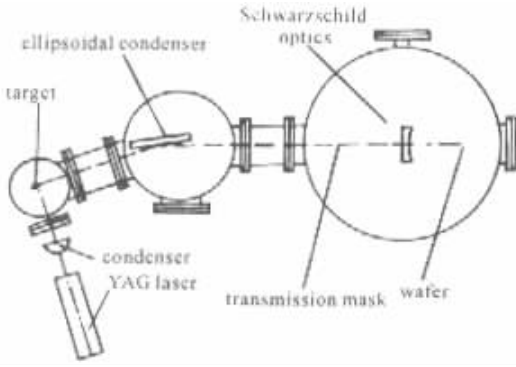


Fig. 2 Configuration of elementary arrangement for EUVL

对极紫外投影光刻原理装置中,掠入射椭球聚光镜的反射面镀有镍磷合金,照明孔径角大于 0.02 。对镍反射镜,掠入射角小于 8.5° 时,可实现大于 50% 的反射率。椭球聚光镜到光源和掩模的距离分别为 $231\ \text{mm}$ 和 $469\ \text{mm}$,其椭球方程为:

$$\frac{x^2}{354^2} + \frac{y^2 + z^2}{55^2} = 1. \quad (1)$$

依据标量散射理论,表面粗糙度对反射率的影响用德拜-沃勒(Debye-Waller)因子表示如下:

$$R = R_0 \exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\varphi}{\lambda}\right)^2\right], \quad (2)$$

其中 R 为实际表面的反射率, R_0 为理想表面的反射率, σ 为表面的粗糙度(RMS), φ 为掠入射角, λ 为入射光波的波长。在 $13\ \text{nm}$ 工作波长处,计算了镍在不同粗糙度下掠入射角对反射率的影响,如图3所示。在图中,曲线簇从上到下对应的表面粗糙度依次为 $0.1\ \text{nm}$ 、 $3\ \text{nm}$ 、 $5\ \text{nm}$ 。由图3可知,表面粗糙度小于 $3\ \text{nm}$ 时,对椭球聚光镜的反射率影响不大。为此,要求椭球聚光镜的表面粗糙度(RMS)小于 $3\ \text{nm}$ 。

图4为利用WYKO表面轮廓仪对加工后椭球聚光镜表面粗糙度的检测结果,小于 $1\ \text{nm}$ (RMS)。

由于我们所设计的施瓦茨投影物镜的像方焦深小于 $1\ \mu\text{m}$,给在像方调焦像面带来了相当的难度。为了精确地调整掩模与硅片的物像位置,利用纵向

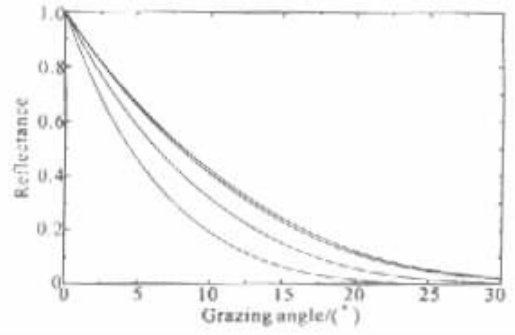


Fig. 3 Reflectance of Ni as grazing angle and roughness.

From top to bottom, the roughness are $0, 1\ \text{nm}, 3\ \text{nm}, 5\ \text{nm}$ respectively

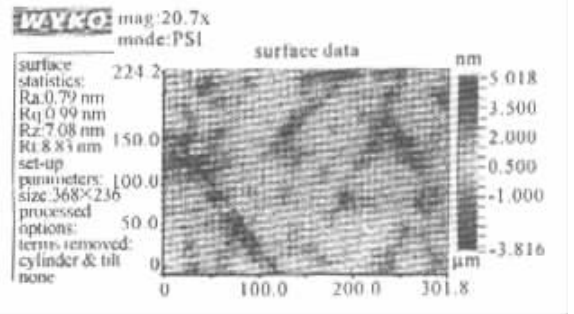


图4为利用WYKO表面轮廓仪对加工后椭球聚光镜表面粗糙度的检测结果,小于 $1\ \text{nm}$ (RMS)。倍率为横向倍率的平方性质,固定像面,在物方沿光轴方向调整掩模,使之精确地成像在焦深之内。为此,透射掩模固定在可沿光轴方向精确移动的精密工作台上。导轨直线性为 $0.3\ \mu\text{m}$,位移分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ 。为了适应高真空环境,该精密工作台采用了滚动结构。

3 施瓦茨微缩物镜设计

考虑到基板加工和多层膜反射镜制备工艺的限制,设计了采用球面施瓦茨结构的微缩投影物镜,倍率 0.1 ,如图5所示。适当选择两个球面的曲率半径 R_1 和 R_2 ,此系统可消除三级球差、慧差和像散,此时系统满足施瓦茨条件:

$$\frac{a}{(a-1)^2} = \frac{(1+M)^2}{(1-M)^2}, \quad (3)$$

其中 $a = R_2/R_1$, M 为系统的放大倍率。施瓦茨物镜的放大倍率为:

$$M = -\frac{R_1 R_2}{2R_1 L_0 - R_1 R_2 - 2R_2 L_0}. \quad (4)$$

式中, L_0 为物像距。从(3)式、(4)式可知, M 、 R_1 、 R_2 和 L_0 中只有两个参数是独立的,只要给定其中的两个参数就可确定其他的参数。设计中,先给定 M 和

R_2 然后经过优化,使 R_1 与标准样板相一致,得到最后结果,各参数见表 1。

图 6 为系统的传递函数曲线。优化过程中,保证了在 $\phi 0.1$ mm 的像方视场内得到优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的分辨率。在主镜和次镜的曲率半径选择上,依据现有的标

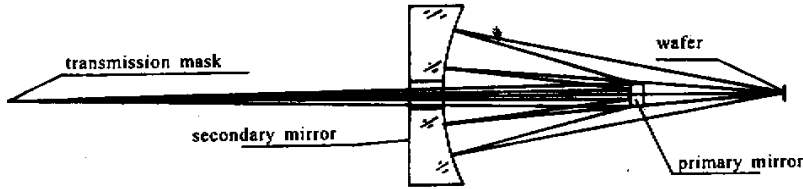


Fig. 5 The layout of Schwarzschild optics

Table 1. Characteristics of Schwarzschild optics

magnification	0.1
numerical aperture	0.2
object distance	231.533 mm
distance between two mirrors	69.473 mm
image distance	126.461 mm
diffraction limit	$0.065 \mu\text{m}$
residual wave front error of design	0.007λ ($\lambda = 13 \text{ nm}$)

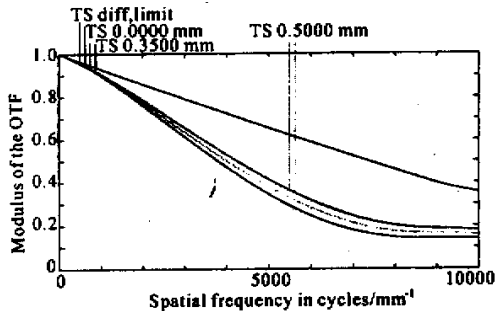


Fig. 6 Calculated modulation transfer function for the Schwarzschild objective

从像差分析可知,我们所选用的施瓦茨结构只能校正三级球差、慧差和像散,系统的五级球差限制了系统数值孔径的增大,轴外五级球差、慧差和像散限制了视场。

4 施瓦茨微缩物镜光学元件的制作

极紫外投影光刻系统为了实现近衍射极限性能的分辨率,其微缩投影光学系统的均方根波差应小于 $\lambda/14$ 。此时分配到每个光学元件的面形精度一般由瑞利(Rayleigh)公式(5)和马雷查尔(Marechal)公式(6)表示:

$$\delta = \lambda/(4n) \quad (\text{PV 值}), \quad (5)$$

$$\sigma = \lambda/(28\sqrt{n}) \quad (\text{RMS 值}), \quad (6)$$

准加工样板,同时考虑了镀膜的均匀性。这是由于系统中的极紫外多层膜反射镜的膜厚在纳米量级,在曲率半径过小的基底上很难制备均匀的膜层。另一方面,选用较大曲率半径的反射镜组成微缩投影物镜会使系统整体尺寸过大。

式中 n 为光学系统的镜面数, λ 为系统的工作波长。对于二镜微缩投影光学系统,为了在 13 nm 处达到近衍射极限性能,每面的 PV 值在 2 nm 以下, RMS 值应为 0.5 nm 以下。

此外,光学元件的表面粗糙度是影响多层膜反射率和光学系统成像质量的重要因素之一。假定表(界)面粗糙度服从高斯分布,则表面粗糙度对反射率的影响如(2)式所示。若要求表(界)面的散射损失小于 10% ,其粗糙度应为 $\sigma \leq \lambda/40$,至少要达深亚纳米。通常认为多层膜的表(界)面粗糙度与光学基板的粗糙度相当,因此光学元件的表面粗糙度也应满足 $\sigma \leq \lambda/40$ 。

我们利用 ZYGO 干涉仪和 WYKO 表面轮廓仪对主、次镜的面形精度和粗糙度进行了检测。检测结果表明,主、次镜的面形精度优于 5 nm ,粗糙度为 0.7 nm 。

图 7、图 8 分别为次镜面形精度和粗糙度的检测结果,次镜的口径为 $\phi 80 \text{ mm}$ 。

极紫外多层膜是人造的一维布拉格结构,其反射可用布拉格衍射计算。当忽略折射与吸收效应时,反射峰值所在的位置由如下的布拉格方程决定:

$$n\lambda = 2d\cos\theta, \quad (8)$$

其中 θ 为入射角,周期厚度 $d = d_1 + d_2$, d_1 和 d_2 分别为两种镀膜材料的膜厚。由(8)式可见,多层膜的反射峰值与膜层的周期厚度和入射角有关。图 9 反映了施瓦茨投影物镜中心光线和两条边缘光线在两块多层膜反射镜上的反射率光谱特性,计算过程采用的光学常数取自 Lawrence Berkeley National Laboratory。由于中心光线在两块反射镜上的入射角不同,为了在系统工作波长 13 nm (95.4 eV) 处得到相同的反射峰值,设计时两块多层膜反射镜的多层膜周期厚度分别为 6.70 nm 和 6.63 nm 。由图 9 可见,在我们所限定

的入射角范围内反射率峰值的变化很小,没有必要采用周期多层膜结构。此外,考虑到镀膜工艺中的膜

厚控制误差为 0.1 nm,最终两块多层膜反射镜的周期厚度均选定为 6.70 nm,膜层数为 81 层。

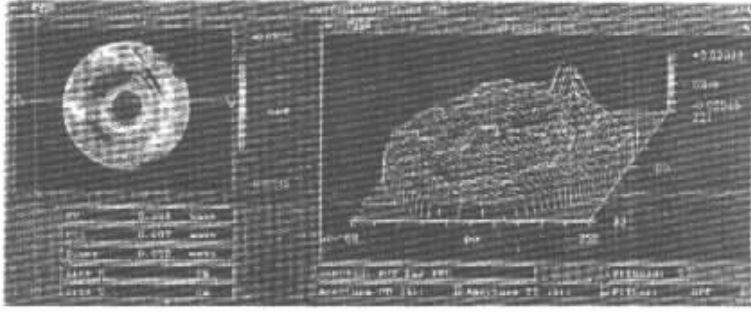


Fig. 7 Measured figure error of secondary mirror with Zygo Mark IV

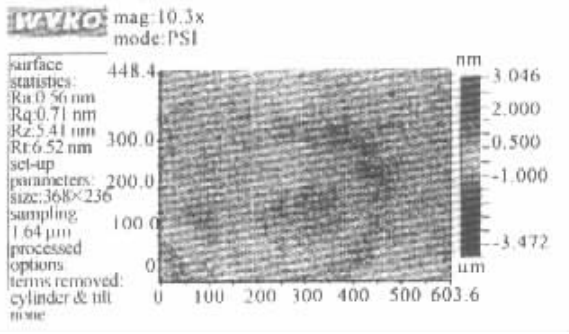


Fig. 8 Measured roughness of secondary mirror with WYKO

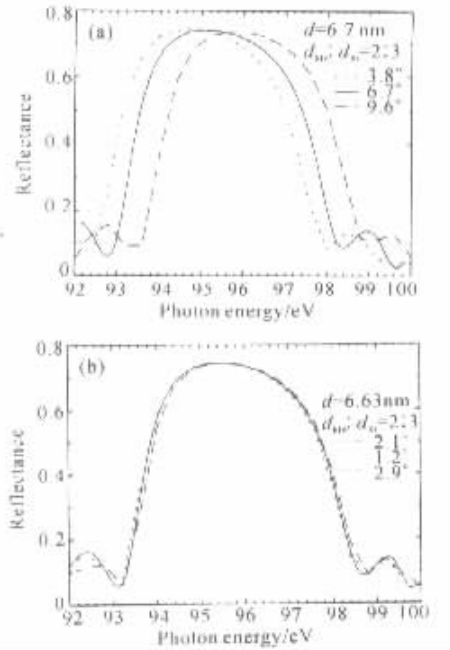


Fig.9 Calculated reflectance of the Mo-Si multilayer coatings applied to the mirrors of Schwarzschild objective. Curves are shown for the central ray and the two extreme ray passing the system. (a) Primary mirror ; (b) Secondary mirror

次镜多层膜的制备,并利用反射率计检测了多层膜反射率及膜厚均匀性。检测结果为:反射率达 60%,膜厚不均匀性小于 2%。图 10 为反射率检测结果,图 11 为膜厚均匀性检测结果。

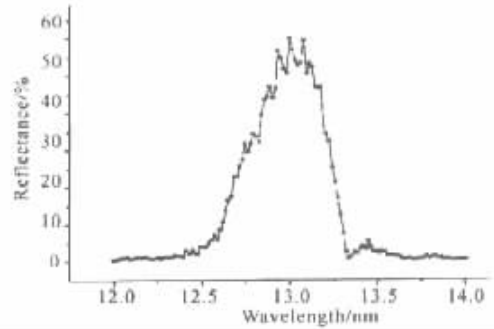


Fig. 10 The reflectivity of M₁ and M₂

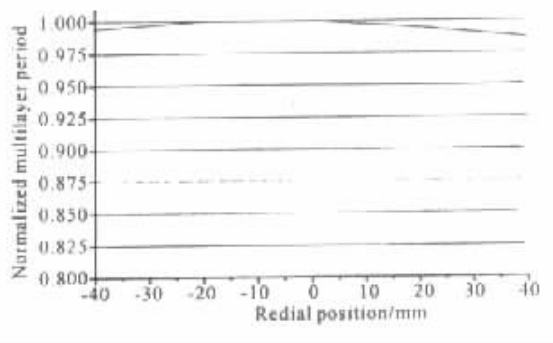


Fig. 11 Variation in the multilayer period vs distance from center of substrate

5 施瓦茨微缩物镜的计算机辅助装调

在光学设计及光学元件加工精度满足要求的前提下,极紫外投影光刻微缩光学系统实现近衍射极限分辨率的关键是保证各光学元件装配、调整的精确性,以使集成后的系统波像差为几纳米。这就意味着利用传统装调方法很难达到要求,必须采用计

我们利用离子束溅射镀膜装置,同时进行了主、

计算机辅助装调技术。图 12 为所采用的计算机辅助装调工艺流程。

图 13 为计算机辅助装调装置,在其指导下完成了极紫外投影光刻实验装置的集成。集成后的系统

波像差为 0.028λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),如图 14 所示,达到了系统模拟的成像质量。比较图 7、图 14 的检测结果,可以发现,其波面误差来自于反射元件加工时的环带差。

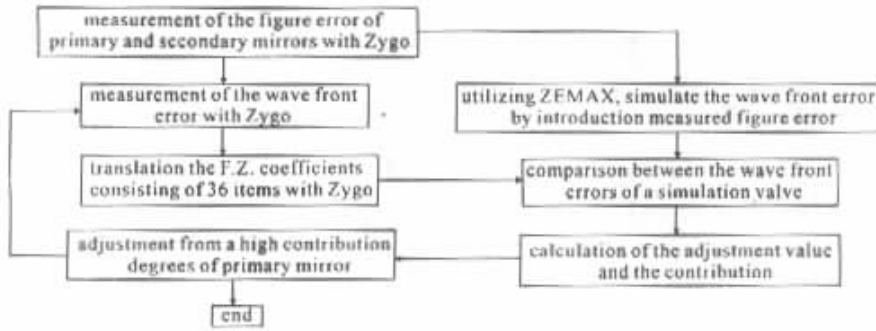


Fig. 12 Flow chart of computer-aided alignment for Schwarzschild optics

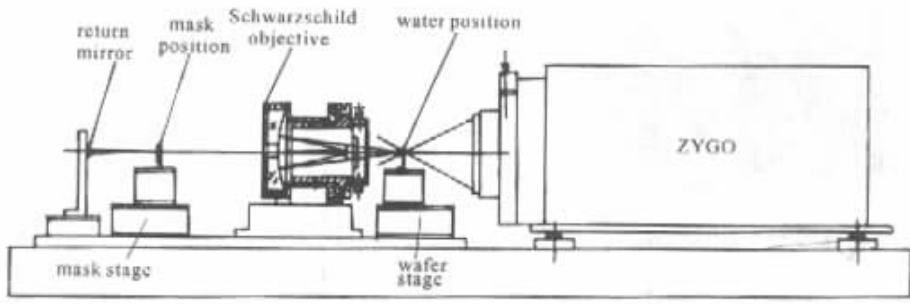


Fig. 13 The arrangement of computer-aided alignment system

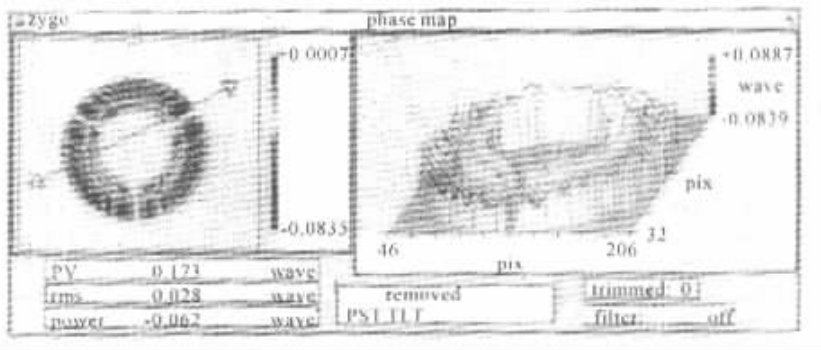


Fig. 14 Wave-front errors by measured in the final objective

结束语 在极紫外投影光刻诸多关键光学单元技术研究基础上,完成了由激光等离子体光源、掠入射椭球聚光镜、透射掩模、施瓦茨微缩投影物镜及相应真空系统组成的极紫外投影光刻原理装置的研制工作。其工作波长为 13 nm ,设计分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 。但由于受 ZYGO 干涉仪面形检测精度所限,实际光学元件的加工未能达到系统所需的精度,导致系统无法达到设计分辨率。通过进一步采用正在研制中

的点衍射干涉仪,可望解决面形检测精度的制约,实现系统的设计分辨率。

参 考 文 献

[1] 木下博雄. 极端紫外线リソグラフィ-用光学系の开发与评价. *O Plus*, 2000, **2**(5): 567~571

[2] Stearns D G, Rosen R S, Vernon S P. Multilayer mirror technology for soft X-ray projection lithography. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34): 6952~6960

[3] Skulina K M, Alford C S, Bionta R M et al.. Molybdenum/beryllium multilayer mirrors for normal

incidence in the extreme ultraviolet. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19) 3727~3730

[4] Sweeney D W, Hudyma R, Chapman H N *et al.*. EUV optical design for a 100 nm CD imaging system. *Proc. SPIE*, 1998, **3331** 2~10

[5] Kinoshita H, Watanabe T, Niibe M *et al.*. Three-

aspherical system for EUVL lithography. *Proc. SPIE*, 1998, **3331** 20~30

[6] Tichenor D A, Kubiak G D, Haney S J *et al.*. Recent results in the development of an integrated EUVL laboratory toll. *Proc. SPIE*, 1995, **2437** 292~307

Development of Elementary Arrangement for Exterme Ultraviolet Projection Lithography

Jin Chunshui Ma Yueying Pei Shu Cao Jianlin

(*The State Key Laboratory of Applied Optics ; Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , The Chinese Academy of Sciences , Changchun 130022*)

(Received 25 June 2001 ; revised 17 September 2001)

Abstract : The prototype for extreme ultraviolet projection lithography at 13 nm wavelength includes a laser plasma source , an ellipsoidal condenser , a transmission mask , the Schwarzschild objective , a resist-coated wafer and the associated vacuum apparatus. The optical design is optimized to achieve a resolution better than 0.1 μm over a 0.1 mm diameter image field of view.

Key words : extreme ultraviolet ; extreme ultraviolet projection lithography ; multilayer reflector ; Schwarzschild objective