

文章编号 1004-924X(2000)01-0066-05

软 X 射线投影光刻原理装置的设计

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, 吉林 长春 130021)

摘要: 首先介绍了投影光刻技术发展的历程、趋势和软 X 射线投影光刻技术的特性, 其次介绍了软 X 射线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、镀有多层膜的 Schw arzchild 微缩投影物镜、涂有光刻胶的硅片及相应的真空系统组成。0.1 倍的 Schw arzchild 微缩投影物镜具有小于 0.2 μm 的分辨率。

关键词: 软 X 射线投影光刻; 多层膜反射镜; 软 X 射线投影光刻原理装置; 激光等离子体光源

中图分类号: TN 305.7 **文献标识码:** A

1 引言

随着信息技术的迅猛发展, 迫切需要特征尺寸小、集成度高的集成电路芯片。表 1^[1]反映了动态随机存储器(DRAM)的发展历程及趋势。每隔三年, 集成电路的集成度增加四倍, 特征尺寸缩小 0.7 倍。在投影光刻系统中, 微缩投影光学系统的衍射分辨率是制约集成电路集成度的决定性因素

之一。为了提高微缩投影光学系统的分辨率, 人们一直在努力提高光学系统的数值孔径(NA)和缩短系统的工作波长。人们普遍认为, 目前正在进行商业开发的准分子激光 248nm 和 193nm 的光刻设备在采用相移掩模和离轴照明等技术后, 可用于制造特征尺寸大于 0.13 μm 、容量达 1Gbit 的 DRAM^[2], 而要制造特征尺寸小于 0.13 μm 的集成电路就必须采用新的光刻技术。

Table 1 DRAM developing history and tendency

items	1992	1995	1998	2001	2004	2007	2010
Resolution (μm)	0.5	0.35	0.25	0.18	0.13	0.1	0.07
Integrated level(bit)	1M	64M	256M	1G	4G	16G	64G

从 20 世纪 80 年代起, 正入射软 X 射线多层膜反射镜得到了飞速发展, 已可以在 11nm ~ 14nm 软 X 射线波段制备出反射率大于 66% 的 Mo/Si 多层膜反射镜^[3]。这样就使得利用多层膜反射镜组成消像差高分辨率软 X 射线投影光刻系统成为可能。和可见-紫外波段相比, 软 X 射线的波长比较短, 通常为 1nm ~ 30nm, 由此组成的软 X 射线投影光刻系统既可获得很高的衍射分辨率, 又可满足必要的焦深要求。例如, 数值孔径为 0.1、工作波长为 13nm 时, 可获得 0.065 μm 的分辨率和大于 1 μm 的焦深。经过近年来的不断

探索, 目前普遍认为软 X 射线投影光刻技术最有可能成为下一世纪特征尺寸小于 0.13 μm 的大规模集成电路生产技术。软 X 射线投影光刻系统为了同时实现高分辨率和大的成像视场, 其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]。根据我国现阶段的技术基础和研究目标, 我们把研究工作的重点放在了投影光刻系统的成像质量上, 而不过分追求成像视场的大小。为此, 在我们的原理装置中选用了同心球面 Schw arzchild 结构, 能够实现三级球差、彗差和像散的校正。

收稿日期: 1999-08-19; 修订日期: 1999-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目, 项目批准号: 69625710

2 Schw arzschild 物镜设计

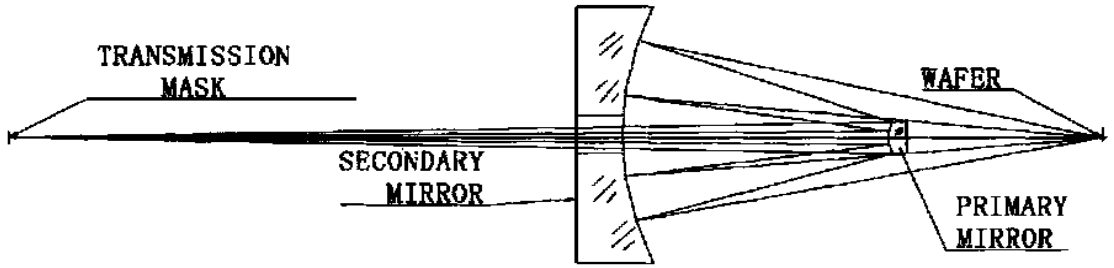


Fig 1 Schematic Schwarzschild optics

考虑到基板加工和多层膜反射镜制备工艺的限制, 我们设计了微缩倍率为 0.1 的微缩投影物镜, 采用了同心球面的 Schwarzschild 结构, 如图 1 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、彗差和像散, 此时系统满足 Schwarzschild 条件:

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

其中 $a = R_2/R_1$, M 为系统的放大倍率. Schwarzschild 物镜的放大倍率为:

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

根据 (1) (2) 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以确定其它的参数. 设计中, 我们先给定 M 和 R_2 , 然后经过优化和让 R_1 与标准样板相一致得到最后结果, 各参数见表 2, 图 2 为系统的传递函数曲线. 在优化过程中, 保证了在 90 mm 的像方视场内得到小于 $0.2 \mu\text{m}$ 的分辨率. 在主镜和次镜的曲率半径选择上, 我们依据现有的标准加工样板, 同时考虑了镀膜的均匀性. 软 X 射线多层膜反射镜的膜厚在纳米或亚纳米量级, 在曲率半径过小的基底上很难制备均匀的膜层, 这将影响镜面反射率的均匀性. 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.

Table 2 Characteristics of the Schwarzschild optics

Reduction rate	0.0956	Wavelength	13nm
Numerical aperture	0.2	obstruction rate	0.4
Focal length	23mm	Distance	69.473mm
Object distance	231.533mm	Image distance	126.461mm
Convex mirror	diameter 8.8mm, radius of curvature 31.48mm		
Concave mirror	diameter 50.3mm, radius of curvature 101.1mm		
Wavefront	0.007 λ ($\lambda = 13\text{nm}$)		

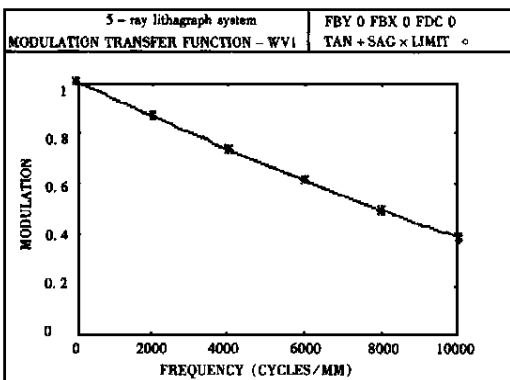


Fig 2 Calculated square-wave modulation transfer function for the Schwarzschild objective

从像差分析可知, 我们所选用的 Schwarzschild 结构只能校正三级球差、彗差和像散, 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、彗差和像散限制了视场. 因此, 要想同时获得高分辨率、大视场的微缩投影系统必须采用非球面系统.

软 X 射线多层膜是人造的一维 Bragg 结构, 对软 X 射线的反射可用 Bragg 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 Bragg 方程决定:

$$n\lambda = 2d \cos \theta \quad (3)$$

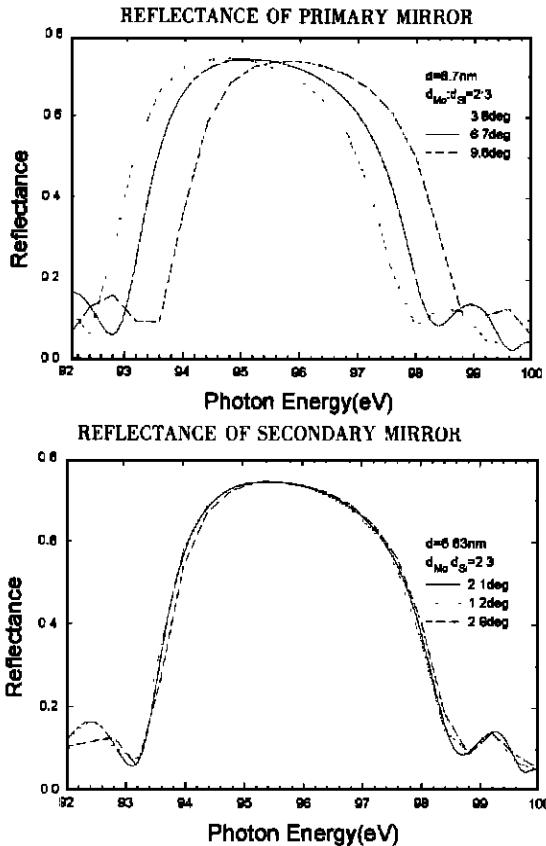


Fig 3 Calculated reflectance of the Mo/Si multilayer coatings applied to the mirrors of Schwarzschild objective. Curves are shown for the central ray and the two extreme ray passing the system

其中 θ 是入射角,周期厚度 $d = d_1 + d_2$, d_1 和 d_2 分别是两种镀膜材料的膜厚。由(3)式,多层膜的反射峰值与膜层的周期厚度和软X射线的入射角有关。当膜层的周期厚度固定时,只与软X射线的入射角有关。在Schwarzschild投影物镜中,入射的软X射线在两块反射镜上有着不同的入射角,而且从中心到边缘入射角发生变化。因此,对于定周期的多层膜,反射峰值与在反射镜上所处的位置有关,这将影响多层膜反射镜反射率的均匀性。图3反映了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与入射软X射线能量的关系。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13nm(95.4eV)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6.7nm和6.63nm。由图3,在我们所限定的入射角范围内反射率峰值的变化很小,没有必要采用变周期多层膜结构。此外,考虑到镀膜工艺中的膜厚控制误差为0.1nm,最终两块多层膜反射镜的周期厚度均选定为6.7nm,膜层数为81层。

3 软X射线投影光刻原理装置

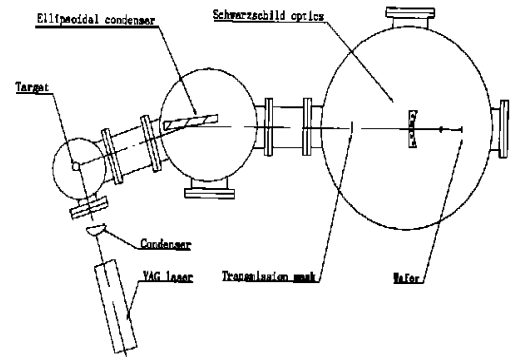


Fig 4 Configuration of elementary arrangement for soft X-ray projection lithography

图4为软X射线投影光刻原理装置结构示意图,真空系统的真空度为 10^{-4} Pa。激光等离子体光源由最大输出能量为1J/pulse、重复频率为1Hz、脉冲宽度为10ns的1.06 μ m调Q 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200mm的聚光镜会聚成 $\Phi 200\mu$ m的光斑轰击铜靶。激光轰击铜靶时,除产生所需的软X射线辐射外,还发出许多对光学反射镜有污染和破坏作用的激光等离子体“碎片”,同时使靶体被轰击处产生凹陷。为了获得稳定的软X射线辐射,激光等离子体光源的靶体需以一定的转速旋转。该转速取决于激光脉冲的重复频率。激光等离子体光源产生的软X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Schwarzschild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 μ m。

在软X射线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。对镍来讲,掠入射角小于8.5 $^\circ$ 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231mm和469mm,其椭球方程为:

$$\frac{x^2}{354^2} + \frac{y^2 + z^2}{55^2} = 1 \quad (4)$$

在软X射线波段,表面粗糙度对反射率有很大的影响。依据标量散射理论,表面粗糙度对反射率的影响用Debye-Waller因子表示如下:

$$R = R_0 \exp[-(4\pi\sigma \sin\theta/\lambda)^2] \quad (5)$$

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), θ 为掠入射角,

λ 为入射光波的波长。我们在 13nm 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 5 所示。图中曲线簇从上到下对应的表面粗糙度依次为 0、1nm、3nm、5nm。由图可知,表面粗糙度小于 3nm 时,对椭圆聚光镜的反射率影响不大。为此,要求椭圆聚光镜的表面粗糙度(RMS)应小于 3nm。

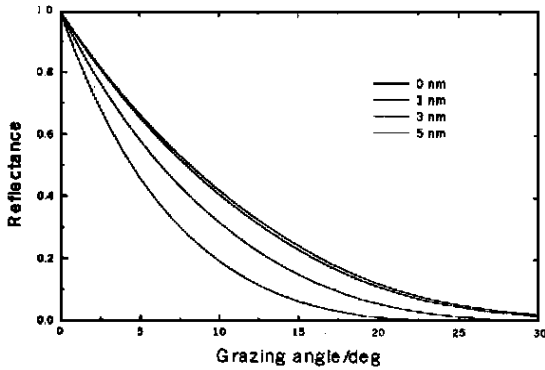


Fig 5 Reflectance of Ni as function of grazing angle and roughness

由于我们所设计的 Schwarzschild 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,我们利用纵向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 $0.5\mu\text{m}$,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。

4 光学基板的加工与检测

多层膜反射镜的基板材料选用了熔石英,全部加工工作在我所的非球面加工中心完成。其表面粗糙度经 WYKO 表面轮廓仪测量,所得表面粗糙度为 0.5nm ,如图 6 所示。图 7 表示了用 ZYGO 干涉仪测量次镜面形的结果,面形精度为 5nm 。这些基板能够适应 13nm 软 X 射线投影光刻原理装置对镜面基板表面粗糙度和面形的要求。

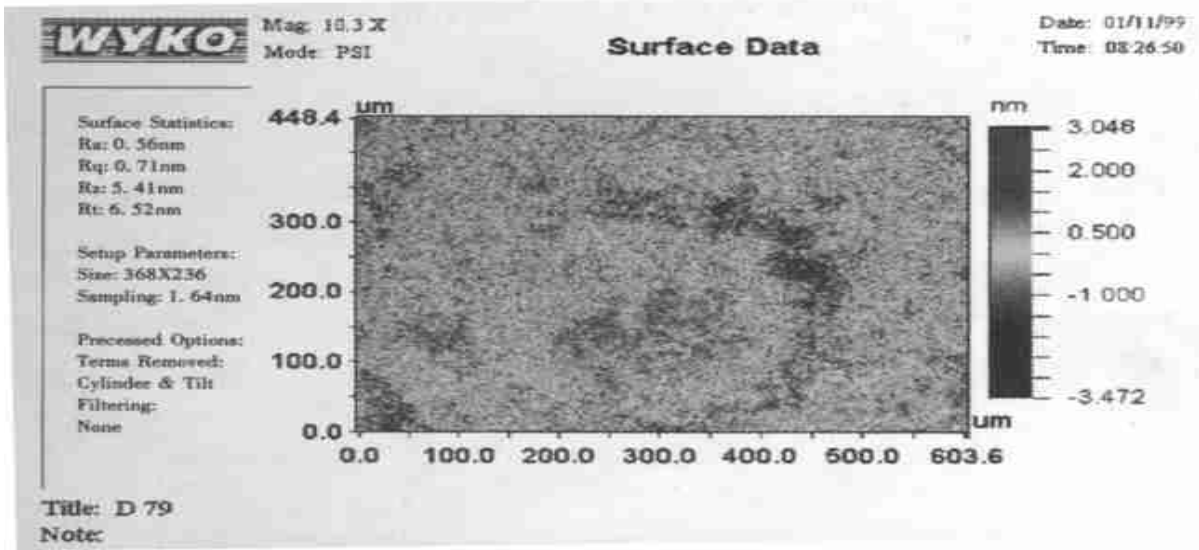


Fig 6 Measured roughness of secondary mirror with WYKO

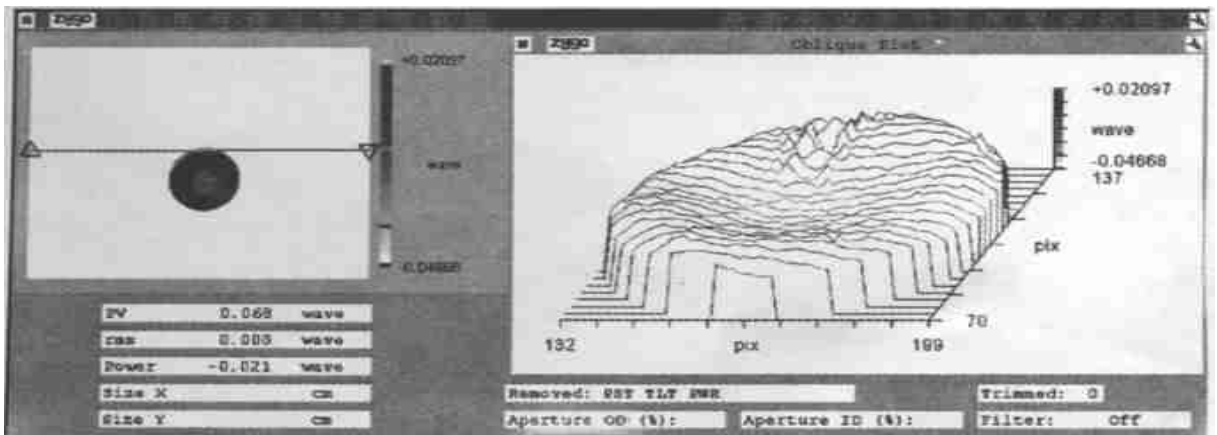


Fig 7 Measured figure error of secondary mirror with Zygo Mark IV

5 结 束 语

为了进行软 X 射线投影光刻原理及诸多相关关键技术的研究,我们设计了软 X 射线投影光刻原理装置。该装置由激光等离子体光源、掠入射

椭圆聚光镜、透射掩模、镀有多层膜的 Schwarzschild 微缩投影物镜、涂有光刻胶的硅片及相应的真空系统组成。微缩投影光学系统采用了球面 Schwarzschild 结构,并保证了在 90 mm 的像方视场内得到小于 $0.2\mu\text{m}$ 的分辨率。

参考文献:

- [1] Kinoshita H. Present and future requirement of soft X-ray projection lithography[A]. Proc SPIE[C], 1992, 1742: 576~ 584
- [2] Updated Roadmap identifies technical strategic challenges[J]. Solid State Technology, 1995, 38(2): 42~ 55
- [3] Stearns D G, Rosen R S, Vernon S P. Multilayer mirror technology for soft X-ray projection lithography[J]. Appl Opt, 1993, 32(34): 6952~ 6960
- [4] Bajuk D, Kestnet R. Fabrication and Testing of EUVL Optics[A]. JSPE Proceedings of the Second US-Japan Workshop on soft X-ray Optics[C], Yamnaka-ko, Japan: 1997. 325~ 335

Development of elementary arrangement for soft X-ray projection lithography

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

*(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)*

Abstract: The prototype for soft X-ray projection lithography at 13nm wavelength is introduced. It includes a laser plasma source, an ellipsoidal condenser, a transmission mask, the Schwarzschild objective, a wafer and the associated vacuum apparatus. The optical design is optimized to achieve smaller resolution than $0.2\mu\text{m}$ over a 90 mm diameter image field of view.

Key words: soft X-ray projection lithography; multilayer reflector; laser plasma source; elementary arrangement for soft X-ray projection lithography

作者简介: 金春水(1964-)男,吉林长春市人,副研究员。1987年7月毕业于浙江大学光学仪器工程学系;1990年3月毕业于长春光机所研究生部,获硕士学位。毕业后,一直从事光学仪器总体研究工作。1997年9月起,在应用光学国家重点实验室攻读在职博士学位,现从事软 X 射线投影光刻系统的研究工作。