

# 大视场投影光刻物镜的畸变特性检测\*

马 韬 沈亦兵

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘 要** 畸变特性是光刻物镜的关键指标,目前少有报道,提出了一种大视场投影光刻物镜畸变测量原理,测量系统和测量数据的处理方法.利用该装置对研制的口径6英寸,分辨率3 μm的物镜进行了测量,得出该物镜在全视场的畸变值小于2.0 μm.

**关键词** 光刻;畸变检测

**中图分类号** TH74 O439 **文献标识码** A

## 0 引言

光刻物镜是光刻设备的核心,其性能直接决定了光刻机的图形传递能力.通常光刻物镜要求具有衍射极限的成像质量,大视场与极小的畸变.投影光刻技术因其精度高,非接触,重复性好等优点成为广泛应用的光刻方式.目前投影光刻物镜领域的研究主要有两种发展方向:一是向深亚微米方向发展的小视场高分辨率物镜,主要用于超大规模集成电路的生产制造,一次光刻面积在25 mm×33 mm左右,分辨率为100 nm,曝光波长从h线(405 nm)i线(365 nm)KrF(248 nm)ArF(193 nm)F2(157 nm),即从中紫外向深紫外,端紫外方向发展<sup>[1,2]</sup>;二是大视场较高分辨率物镜,是针对液晶板等新的应用而出现的在3~5 μm量级上的光刻,一次光刻面积在6英寸或8英寸左右,主要用于大面积高集成度微电子器件如液晶板和关键芯片周边超细的胶片板的制作.

本文通过研发大视场投影光刻物镜系统,开发一套对于投影光刻物镜研制至关重要的特性检测系统——畸变检测系统,通过对系统性能的检测和分

析来控制和优化投影光刻物镜的开发.畸变测量对分析和研究投影光刻物镜性能具有重要意义,国外有关投影光刻物镜畸变测量的报道很少,特别是大视场投影光刻物镜的畸变测量,本文介绍了一种针对大视场投影光刻物镜的畸变测试技术和方法.

## 1 大视场投影光刻物镜及畸变特性检测

### 1.1 大视场投影光刻物镜光学系统

图1是采用ZEMAX软件优化设计得到的大视场投影光刻物镜光学系统光路图.设计参量如表1所示.根据瑞利公式计算

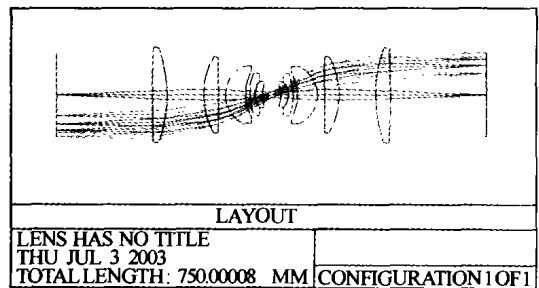


图1 大视场投影光刻物镜光学系统  
Fig. 1 Large field projection lithography optical system

表1 大视场投影光刻物镜部分设计参量

Diameter of aperture D/mm	NA	Amplification β	Wavelength λ/μm	Object-image conjugate distance/mm	Dimension of exposure/inch	Distortion δY/μm
200	0.042	-1.0000	0.365	750	6	≤ ±3.0

$$\delta = k_1 \lambda / NA \quad (1)$$

式中δ为实用分辨率,λ为曝光波长,NA为像方数值孔径,k<sub>1</sub>是与系统照明方式,光源相干度和数值孔径等有关的工艺系数,对于典型的i线光刻,通常k<sub>1</sub>=0.25~0.35<sup>[3,4]</sup>,由式(1)得δ=2.17~3.04 μm,满足投影光刻物镜全视场分辨率在2~5 μm左右的技术指标要求.

依照光学设计要求和主要技术指标,确定一个适当的大视场投影光刻物镜光学系统初始结构<sup>[5]</sup>,在满足光学参量要求下控制各像差项(球差,像散,

慧差和畸变等)进行优化,各种像差对设计指标的影响必然表现在光学传递函数MTF上,系统要求理论分辨率与实际分辨率之差在空间分辨率为100 lp/mm范围内必须小于5%.在克服掩模硅片位置偏离和倾斜引起倍率误差与对准误差的同时,满足掩模硅片视场同轴对准要求,光学系统要设计成左右全对称的双方远心光路结构,校正畸变等对称像差,在大孔径,宽焦深,的情况下,整个视场范围内成像质量达到衍射极限,光刻线条均匀.

设计时要考虑在严格物像面共轭面上的畸变为零,物面沿轴上下位移导致畸变出现正负变化,通过对物像面的调整,可以方便的得到最小畸变物像面

共轭位置.

### 1.2 畸变测量原理

检测大视场投影光刻物镜系统的畸变特性需构建一个高精度、大尺度的二维平面图像对准与坐标测量系统. 使用该系统对光刻的硅片和掩模板图形进行测量, 再通过掩模板(物)和硅片(像)的数据对比计算光刻系统的畸变. 光学系统的畸变理论上定义为

$$\delta y'_z = y'_z - y' \quad (2)$$

式中,  $y'_z$  为不同视场的主光线经光学系统成像后与高斯像面的交点高度(实际测量获得);  $y'$  为理想像高. 而对于放大倍率为  $\beta = -1$  的投影光刻物镜, 畸变的含义就是光刻像(硅片上)偏离物(掩模板)的程度. 因此畸变的定义可写为

$$\delta y'_z = y'_z - y \quad (3)$$

式中,  $y$  为掩模版上物体的高度(实际测量获得). 对于放大率  $\beta \neq -1$  的投影光刻物镜, 畸变的含义就变为测量得到的像高与理想系统应有的像高(物高与放大倍率乘积)之差, 即

$$\delta y'_z = y'_z - y\beta^* \quad (4)$$

式中,  $\beta^*$  为放大倍率  $\beta$  的绝对值. 理论上要严格测量畸变, 必须测量出  $y'_z, y$  和  $\beta^*$  才能测量出畸变在各个视场中的值  $\delta y'_z$ .

由于光学系统本身是一个畸变很小的系统, 而且畸变随视场的变化是 3 次方的关系, 可以认为小视场时畸变为零, 因此只要精确测出在小视场时掩模版上的物高  $y_p$  和硅片上的像高  $y'_w$  即可得到  $\beta^*$  ( $\beta^* = y'_w/y_p$ ), 这样我们可以通过测量各个视场上  $y'_{zw}$  和  $y_w$  来求出畸变值  $\delta y'_{zw}$ .

图2表示在掩模版上在不同的视场上分布有  $5 \times 5$  个十字对准标记, 经光刻物镜曝光后在硅片上获得  $5 \times 5$  个十字对准标记像, 通过精确测量不同标

记的  $Y_w$  和  $Y_w'$  即可算出各个视场中的畸变值  $\delta Y_w$ .

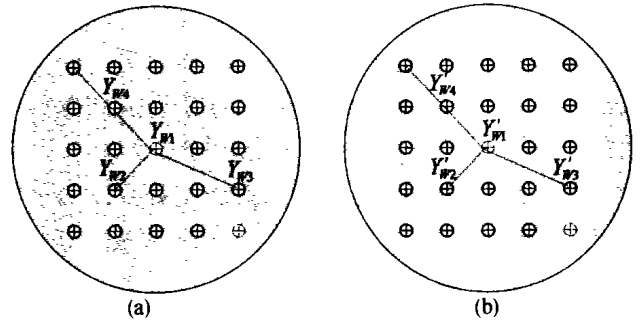


图2 (a) 具有全视场分布十字对准标记的掩模 (b) 光刻后在硅片上形成的十字对准标记的像  
Fig.2 (a) Mask with all field cross marker, (b) Image of cross marker on the wafer after lithography

图3所示的是测量平面上标记点坐标的二维精确测量系统, 该系统使用双频激光坐标测量气浮工作台, 驱动载物台使得吸附其上的掩模或硅片移动, 移动的定位由监视器的对准标记与掩模或硅片上的标记重合为准, 具有测量范围大, 精度高等优点. 双频激光测长系统记录下不同标记点的  $x$  和  $y$  坐标, 即可算出物高和像高. 系统中所用的气浮工作台是日本 YOKOGAWA 公司生产的 750N 系列, 其运动范围为 350 mm, 测量和对准精度为  $0.1 \mu\text{m}$ .

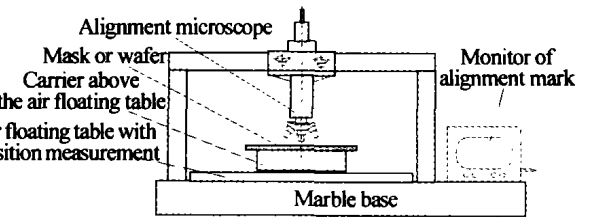


图3 畸变测量系统  
Fig.3 Schematic diagram of the distortion measurement system

## 2 测量数据分析

我们对研制的物镜在上述测试系统上进行了一系列测试, 得到数据如表 2、3 所示, 其中  $x, y, x', y'$  分别为掩模与硅片图形标记点的坐标.

表2 通过畸变检测系统测量得到的掩模与硅片图形部分标记点的位置坐标

Mask	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	Wafer	$P'_1$	$P'_2$	$P'_3$	$P'_4$	$P'_5$
1	$x/\mu\text{m}$ 152696.10	182695.50	...	...	272694.10	$x'/\mu\text{m}$ 154377.50	184367.20	...	...	274335.60	
	$y/\mu\text{m}$ 151840.60	151613.50	...	...	150931.90	$y'/\mu\text{m}$ 150431.10	150583.70	...	...	151041.20	
2	$x/\mu\text{m}$ 152923.20	182922.60	...	...	272921.30	$x'/\mu\text{m}$ 154225.20	184214.80	...	...	274183.10	
	$y/\mu\text{m}$ 181840.10	181613.00	...	...	180931.50	$y'/\mu\text{m}$ 180421.30	180574.40	...	...	181031.20	
3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	$x/\mu\text{m}$ 153604.50	183604.00	...	...	273602.50	$x'/\mu\text{m}$ 153767.80	183757.70	...	...	273725.60	
	$y/\mu\text{m}$ 271833.80	271611.60	...	...	270930.20	$y'/\mu\text{m}$ 270389.20	270541.50	...	...	270999.30	

由于系统是极小畸变系统, 小视场时畸变对放大倍率的影响可以忽略, 由实验测得的数据可以得到

$$\beta^* = \frac{1}{N} \sum \frac{y'_w}{y_p} = 0.999650267 \quad (5)$$

畸变理论上应根据式(5)由测量得到的掩模

(物方)与硅片(像方)的相应数据进行计算, 但一般说来, 标记点的测量数据并不能直接计算得到系统的畸变特性. 因为测量过程中, 通过分别对掩模板和曝光后硅片图形进行测量, 以工作作为绝对坐标, 掩模板和硅片的放置位置间存在一定的位移和

偏角,同一物像共轭点的测量数据并不能直接代表物像关系,所以需要掩模和硅片图形测量后获得的数据进行处理,校正位移和偏角,再用掩模图形的校正数据与放大倍率的乘积作为系统所成理想像的数据,与校正过的硅片数据比较求出畸变量。

首先需要校正掩模图形与曝光后硅片图形之间的偏角和放大倍率的影响。对于硅片图形标记点校正后

$$\begin{aligned} x''' &= r' \cos(\theta' + \Delta\theta_y) \\ y''' &= r' \sin(\theta' + \Delta\theta_x) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $x''', y'''$  为校正后的硅片图形标记点坐标,  $\theta'$  为标记点与选定的旋转中心连线与  $x$  轴的夹角(本文以  $P_{13}(x', y')$  点为旋转中心,校正后该点数据不变),  $r'$  为标记点与旋转中心的距离,  $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$  分别表示硅片图形标记点水平(垂直)连线与  $x(y)$  的夹角平均值,即

$$\Delta\theta_x = \frac{\sum_{j=1}^5 \text{Ang}(P'_{sj} - P'_{lj})}{5} \quad (7)$$

$$\Delta\theta_y = \frac{\sum_{i=1}^5 \text{Ang}(P'_{is} - P'_{il})}{5}$$

表3 校正后部分掩模和硅片图形标记点坐标

Mask	1	2	3	4	5	Mask	1	2	3	4	5	
1	$x''/\mu\text{m}$	154071.85	184061.93	...	...	274031.50	$x'''/\mu\text{m}$	154071.87	184061.64	...	...	274031.35
	$y''/\mu\text{m}$	150735.38	150735.45	...	...	150735.36	$y'''/\mu\text{m}$	150735.20	150735.25	...	...	150735.12
2	$x''/\mu\text{m}$	154071.99	184061.98	...	...	274031.44	$x''/\mu\text{m}$	154071.87	184061.64	...	...	274031.44
	$y''/\mu\text{m}$	180725.97	180726.54	...	...	180725.75	$y''/\mu\text{m}$	180725.06	180725.12	...	...	180725.08
3	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5	$x''/\mu\text{m}$	154071.91	184062.19	...	...	274031.26	$x''/\mu\text{m}$	154071.85	184061.72	...	...	274031.33
	$y''/\mu\text{m}$	270695.03	270694.80	...	...	270695.01	$y''/\mu\text{m}$	270694.86	270694.82	...	...	270694.88

用校正后的掩模图形坐标点数据作为系统所成理想像的数据,与校正后的硅片图形标记点的数据进行比较,即可求出大视场投影光刻物镜系统的在  $x, y$  方向上的畸变量

$$\begin{aligned} \delta X &= x'' - x''' \\ \delta Y &= y'' - y''' \end{aligned} \quad (11)$$

数据如表4所示,求得最大畸变量为  $\delta X_{\max} = \pm 1.48 \mu\text{m}$ ,

表4 大视场投影光刻物镜的畸变数据

Distortion	1	2	3	4	5	
1	$\delta X/\mu\text{m}$	-0.03	0.29	0.01	-0.12	0.15
	$\delta Y/\mu\text{m}$	0.19	0.20	0.22	0.13	0.25
2	$\delta X/\mu\text{m}$	0.12	0.34	0.26	-0.22	-0.00
	$\delta Y/\mu\text{m}$	0.91	1.42	0.34	0.35	0.67
3	$\delta X/\mu\text{m}$	-0.34	1.48	0.30	-1.48	0.34
	$\delta Y/\mu\text{m}$	0.33	0.14	0.04	0.18	0.39
4	$\delta X/\mu\text{m}$	0.10	0.82	0.54	-0.74	0.28
	$\delta Y/\mu\text{m}$	-0.65	-0.54	-1.42	-0.50	-0.29
5	$\delta X/\mu\text{m}$	0.05	0.47	0.49	-0.69	-0.07
	$\delta Y/\mu\text{m}$	0.17	-0.02	-0.10	0.02	0.13

校正后的数据如表3所示。对于掩模图形标记点校正后

$$\begin{aligned} x'' &= r \cos(\theta + \Delta\theta_y) \beta^* \\ y'' &= r \sin(\theta + \Delta\theta_x) \beta^* \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $x'', y''$  为校正后的掩模图形标记点坐标,  $\theta$  为标记点与选定的旋转中心连线与  $x$  轴的夹角(本文以  $P_{13}(x, y)$  点为旋转中心,校正后该点数据不变),  $r$  为标记点与旋转中心的距离,  $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y$  分别表示掩模图形标记点水平(垂直)连线与  $x(y)$  的夹角平均值。校正掩模和硅片图形之间的偏角和放大倍率影响后,仍然存在较大的位移需要进一步校正。

$$\begin{aligned} \Delta x &= \max(x'' - x''') + \min(x'' - x''')/2 \\ \Delta y &= \max(y'' - y''') + \min(y'' - y''')/2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中,  $\Delta x, \Delta y$  是为了校正位移掩模图形需要平移的距离,校正后掩模图形标记点的坐标为

$$\begin{aligned} x''' &= x'' - \Delta x \\ y''' &= y'' - \Delta y \end{aligned} \quad (10)$$

校正后的数据如表3所示。

$\delta Y_{\max} = \pm 1.42 \mu\text{m}$ , 满足投影光刻系统对于全视场畸变小于  $\pm 2.0 \mu\text{m}$  的要求。系统畸变图形如图4所示。

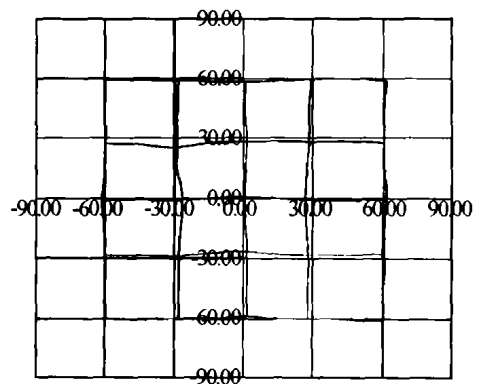


图4 大视场投影光刻物镜系统畸变示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of the distortion of the large field projection lithography optical system

### 3 结果与讨论

本项目在开发大视场投影光刻物镜同时,研究

物镜性能(分辨率和畸变)检测系统. 由测试结果可以看出,本项目研制的大视场投影光刻物镜满足设计要求;物面沿光轴平移,像面呈现正(负)畸变变化,且图形具有良好的枕形(桶形)结构,便于获得最小畸变物像共轭面.

由实际测量得到的数据可以看出,标记点完全相反的畸变值并不相等,其原因通常为:大视场投影光刻物镜光学系统不是完全旋转对称,局部表面存在一定的面形误差;测量装置的精度误差;坐标原点的选择不适当. 对于该系统可以通过合理的加工装调,测量平台的容差平衡和坐标原点的合理移动使畸变的不对称性减至最小. 将掩模和硅片送到日本相应公司测出的畸变为  $\delta X_{\max} = \pm 1.64 \mu\text{m}$ ,  $\delta Y_{\max} = \pm 1.68 \mu\text{m}$ ,说明我们的方法和其他方法在量上的一致性.

## 参考文献

- 1 Cote D, Ahouse D, Galburt D, *et al.* Advances in 193 nm lithography tools. *Proc SPIE*, 2000, **4000**: 542 ~ 550
- 2 Wong A K. Microlithography: Trends, Challenges, Solutions, and Their Impact on Design. *IEEE Micro*, 2003, **23**(2): 12 ~ 21
- 3 Wagner C, Kaiser W, Mulkens J, *et al.* Advanced technology for extending optical lithography. *Proc SPIE*, 2000, **4000**: 344 ~ 357
- 4 Harriott L R. Limits of lithography. *Proc IEEE*, 2001, **89**(3): 366 ~ 374
- 5 沈亦兵, 杨国光. 物镜像差对分辨率影响的一种测量分析法. *光子学报*, 1999, **28**(2): 165 ~ 169  
Shen Y B, Yang G G. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 165 ~ 169

## Distortion Detect of Large Field Projection Lithography Lens

Ma Tao, Shen Yibing

Zhejiang University State Key Laboratory of Optical Instrument, Hangzhou 310027

Received date: 2003-10-29

**Abstract** Distortion is the key index of lithography lens system, but there is no much reports about it. This paper presents a new theory and system about distortion detect, and a new method about how to process the detected data. A new 6-inch dimension, 3  $\mu\text{m}$  resolution large field projection lithography lens was detected with this system and the results is that the distortion of this lithography lens is less than 2.0  $\mu\text{m}$  in all field.

**Keywords** Lithography Technology; Distortion Detect



**Ma Tao** was born on December 25, 1978 in Liaoning, China. He graduated from Department of Optical Engineering of Zhejiang University in 1997. Currently he is pursuing his Ph. D. degree and his research activities are in optical precision instruments and optical MEMS.