

基于叠栅条纹相位解析的纳米检焦方法

冯金花 胡松 李艳丽 何渝

中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209

摘要 随着光刻机分辨率节点的提高, 纳米级的高精度检焦技术变得愈发重要。针对投影光刻的特点, 介绍了一种基于叠栅条纹相位解析的纳米检焦方法。此方法基于三角法测量原理, 通过光弹调制器和横向剪切板的光学调制、平行平板的相位调整, 硅片位移的变化会引起调制光强发生正余弦变化。根据光强的正余弦变化, 求出焦面位移量。经实验与数据分析, 该方法具有纳米级的检焦精度, 且具有实时性强、非接触等特点, 能满足 100 nm 投影光刻中焦面检测的需要。

关键词 测量; 纳米检焦; 相位解析; 光弹调制; 横向剪切板

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0212005

Nano Focusing Method Based on Moire Fringe Phase Analysis

Feng Jinhua Hu Song Li Yanli He Yu

State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract With the improvement of lithography resolution node, high precision focus detection method becomes more and more important. The focus detection method which is based on moire fringe phase analysis and the triangulation principle is introduced. By analyzing optical modulation of photoelastic modulator and Savart plate, adjusting the parallel plate, the light intensity modulation which is caused by focal plane displacement changes in sine or cosine form. By analyzing the experimental data, focusing accuracy of this method is at nanoscale, hard real-time, and non-contact. It can meet the need of projection lithography with the line width of less than 100 nm.

Key words measurement; nano focusing; phase analysis; photoelastic modulation; Savart plate

OCIS codes 120.;050.1950; 050.2770;050.5080

1 引言

20世纪末以来, 微处理器和动态随机存取存储器(DRAM)特征尺寸的缩减呈现了加速和偏离摩尔定律的趋势, 加速了光刻机的变革步伐^[1]。光刻机从 65 nm 节点分辨力的 193 干式光刻发展到 32 nm 节点的 193 浸没式光刻。随着极紫外(EUV)光刻时代的来临, 光刻的分辨力将提升至 22 nm 节点。根据瑞利衍射定理, 分辨力的提高可通过增大光刻数值孔径和缩短曝光波长实现。分辨力的提高是以牺牲焦深为代价, 同时受其他因素的影响, 如硅片工艺热处理、衬底的地形、硅片受真空吸附力、工件台步进误差等, 有效的调焦焦深大幅缩小。因此为保证曝光线条质量和电路的成品率, 需进行纳米级的高精度实时检焦^[2]。

在检焦精度需求较低的情况下, 一般采用 CCD 光度检测方法, 可以满足亚微米量级精度。针对纳米量级的焦面检测, 有激光干涉检焦技术^[3-4]、泰伯效应的叠栅条纹法^[5]以及光弹调制法^[6-8]。激光干涉检焦技术不能抑制硅片工艺层引起的薄膜干涉; 激光干涉检焦技术、泰伯效应的叠栅条纹以及光弹调制法都非常容易

收稿日期: 2014-07-20; 收到修改稿日期: 2014-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61376110)

作者简介: 冯金花(1985—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事微电子专用设备软件技术方面的研究。

E-mail: girlfjh@163.com

受环境的影响且后端的解调电路复杂。

本文提供了一种简单、高效率、纳米级的高精度检焦方法,入射光经过标记光栅及远心成像系统后,被分光棱镜分成相同的两支光路,每支光路经过检测光栅、光电探测器和电路解调后,硅片焦面位置的移动引起调制光强发生正弦变化,可求出标记光栅相位变化,确定标记光栅像的平移量,从而求出焦面位置的变化量。此方法具有工作效率高、检焦精度高、非接触、后端解调电路简单等优点。

2 检焦基本原理

采用三角测量法,如图1所示,将硅片Z向位移变化转化为标记光栅像在探测系统中的横向位移 ΔX ,通过对 ΔX 进行检测,实现检焦。

$$\Delta X = \Delta Z \frac{\sin 2\gamma}{\sin \gamma}, \quad (1)$$

式中 γ 为入射角的余角。为了提高测量分辨力,通常以较大的入射角在硅片表面成像,同时能够消除工艺膜层对光的干涉。在所述的检焦方法中,采用的入射角为 86° 。

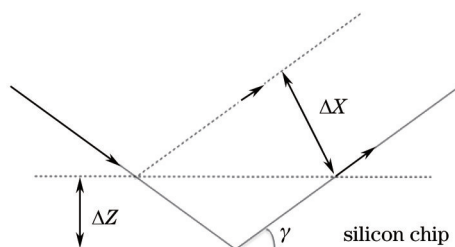


图1 检焦测量模型

Fig.1 Measurement model of focus detection

整个检焦系统结构如图2所示,主要由照明系统1、标记光栅3、第1远心成像系统(4,5)、第2远心成像系统(9,10,11,12)、分光棱镜13、像剪切系统(131,141)、平行平板(132,142)、检测光栅(133,143)、光电探测器系统(136,146)等组成。由照明系统1输出的光经扩束后由光纤引入光路,经过聚光镜2均匀照明标记光栅3的,标记光栅3像经过由透镜4和5组成的第1远心成像系统后,由棱镜6成像在硅片7表面,被反射后经过棱镜8以及由透镜9、起偏器10、光弹调制器组件11、透镜12组成的第2远心成像系统后,由分光棱镜13将光路分成两支。在第二远心成像系统中加入光弹调制器组件11相当于增加一个高频载波,增加系统的抗干扰和抗噪声的能力。由分光棱镜13分成的两支光路结构相同,能量也相同。其中一支光路通过横向剪切板131把衍射光分切为偏振方向相互垂直的o光和e光,形成两组相互错位的正弦分布光束,通过平行平板132形成的干涉图样和目标像经由检测光栅133调制,经过检偏器134、聚光镜135,硅片7焦面位置的移动引起调制光

1: illuminating system; 2: collecting lens; 3: reference grating; 4,5: the first telecentric imaging system;
6: prism; 7: silicon chip; 8: prism; 9~12: the second telecentric imaging system;
13: beam split prism; 131,141: image shear system; 132,142: parallel plate; 133,143: detecting grating;
134, 144: analyzer; 135,145: collecting lens; 136,146: photoelectric detector

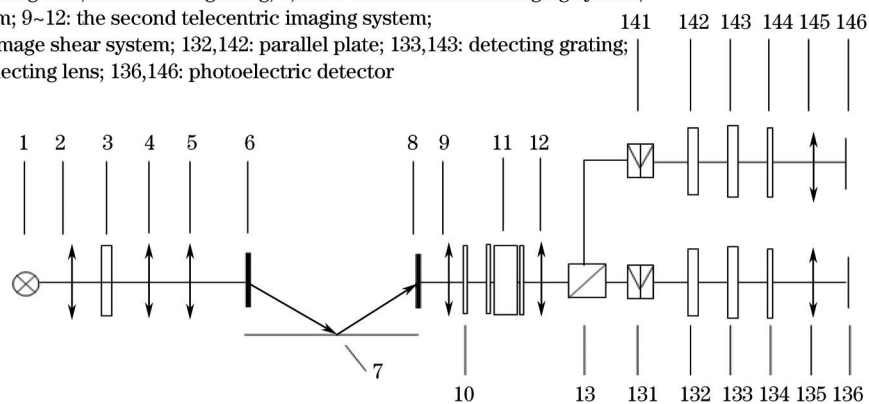


图2 基于叠栅条纹相位解析的检焦光路示意图

Fig.2 Optical schematic of focus detection based on moire fringe phase analysis

强的正弦变化,再由光电探测器 136 探测;另一支光路通过横向剪切板 141 把衍射光分切为偏振方向相互垂直的 o 光和 e 光,形成两组相互错位的正弦分布光束,通过平行板 142(可调相位差,使两支光路的相位差 90°)形成干涉图样和目标像经由检测光栅 143 调制,经过检偏器 144、聚光镜 145,硅片 7 焦面位置的移动引起调制光强的正弦变化,由光电探测器 146 探测;光电探测器 136 和光电探测器 146 得到的光强变化再经由电路解调,由模数(AD)采集卡传送到计算机。根据 AD 采集到的光强的正余弦变化,求出标记光栅 3 相位变化 θ ,确定标记光栅 3 像的平移量 ΔX ,从而求出焦面位置的变化量 ΔZ 。整个检焦系统装置的实物图如图 3 所示。

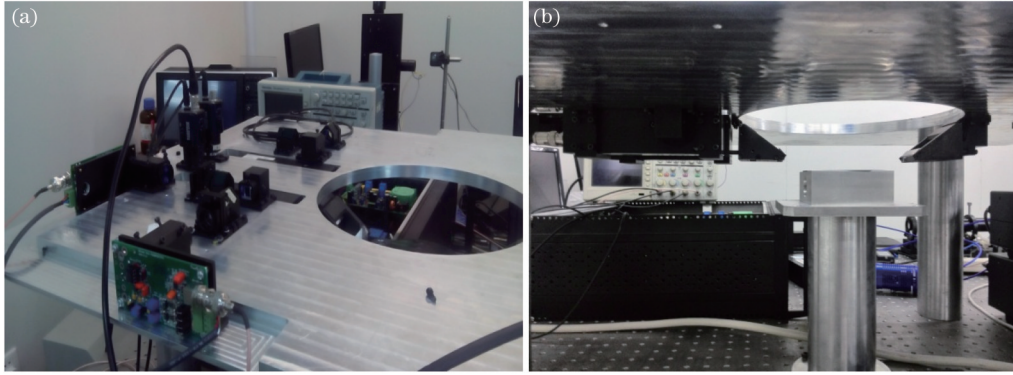


图 3 检焦装置实物图。(a)检焦装置表面实物图;(b)检焦装置底面实物图

Fig.3 Physical map of focusing device. (a) Focusing device surface physical map; (b) focusing device bottom physical map

3 理论分析

从第 2 远心成像系统结构开始讨论。第 2 远心成像镜头由起偏器、光弹调制器^[9-13]组件,以及成像镜头构成。光弹调制器组件如图 4 所示。使用琼斯矩阵方法计算出射光能量。

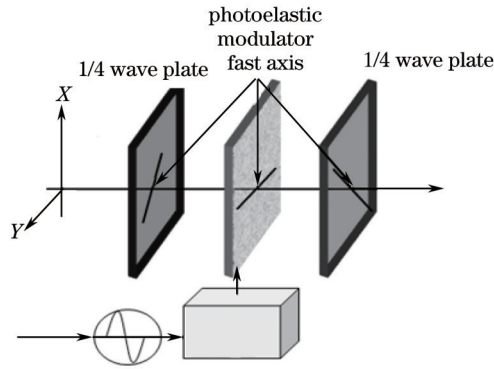


图 4 光弹调制系统

Fig.4 System based on photoelastic modulator

通过起偏器后的线偏振光,入射 $E_{in} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix}$, θ_1 为起偏器透光轴与 X 轴的夹角,经过光弹调制,对第一

块 1/4 波片, $G_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$, 对第二块 1/4 波片: $G_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}$, 对调制器光学头:

$G_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}$ 。则出射为

$$E_1 = G_3 G_2 G_1 E_{in} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta(t)}{2} \cos \theta_1 - \sin \frac{\delta(t)}{2} \sin \theta_1 \\ \sin \frac{\delta(t)}{2} \cos \theta_1 - \cos \frac{\delta(t)}{2} \sin \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\delta = \frac{\pi}{2} \sin(2\pi/l)$ 为调制器光学头对光束产生的相位差。

经过光弹调制器出射的光束经过分光棱镜后,分成两支相同的光路,通过横向剪切板,把线偏振光剪切成错位的两束正交偏振光。通过检测光栅后,两束正交光的光强为

$$I_o(x_w) = 2I \left[1 + \frac{2}{\pi} \cos \left(4\pi \frac{x-s}{p} \right) \right], \quad (3)$$

$$I_e(x_w) = 2I \left[1 + \frac{2}{\pi} \cos \left(4\pi \frac{x+s}{p} \right) \right]. \quad (4)$$

对于 o 光, $\mathbf{E}_{1o} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{E}_1$, 对于 e 光, $\mathbf{E}_{1e} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{E}_1$, 通过检偏器后,其光强为

$$I_{eo} = I_e \cdot |\mathbf{E}_{1e}|^2 = I_e \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \delta(t) \right], \quad (5)$$

$$I_{oo} = I_o \cdot |\mathbf{E}_{1o}|^2 = I_o \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \delta(t) \right]. \quad (6)$$

探测器不能区分光束的偏振态,只能接收总能量,所以

$$I' = I_{eo} + I_{oo} = \frac{I_e + I_o}{2} + \frac{1}{2}(I_e - I_o) \sin \delta. \quad (7)$$

将(3)、(4)式代入(7)式,推导后可得

$$I' = A \left[1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{2\pi}{P} x \cdot \sin \delta(t) \right], \quad (8)$$

式中 $A = \frac{I \cdot P}{4}$, P 为检测光栅的周期。

通过分光棱镜分成的两支光路,其两支光路结构相同,通过手动调整平行平板,使两支光路的相位差 90° 。一支光路的探测器接收的光强为 $I' = A[1 - \frac{\pi}{2} \sin \frac{2\pi}{P} x \cdot \sin \delta(t)]$, 则另一支光路的光强为 $I' = A[1 - \frac{\pi}{2} \sin(\frac{2\pi}{P} x + 90) \cdot \sin \delta(t)]$ 。

4 实验数据分析

在实际情况中,光路结构和电路设计都不可能达到完全一致,因此两支光路的周期、幅值都不一致,且两支光路的相位差通过平行平板的调整也不可能完全达到 90° , 如图 5 所示,为压电陶瓷(PZT)运动 $40 \mu\text{m}$ 、步长为 $0.05 \mu\text{m}$ 时,两支光路得到的光强信号,因此在实际检焦过程中需要对幅值以及相位差进行标定。由(8)式中,忽略掉谐波分量和常数,(8)式可以表示为 $I' = A \sin \theta$, ($\theta = \frac{2\pi}{P} x$, x 为焦面离焦量),因此两支光路的能量可以表示为 $I_1 = A_1 \sin \theta$, $I_2 = A_2 \sin(\theta + \Delta\theta)$ 。相位差 $\Delta\theta$ 的标定通过取两条曲线的峰值相位差、谷值相位差、零点相位差,然后取其均值。幅值的标定分别取两曲线的波峰波谷值,取其均值。根据图 5 中的数据,各参数标定后的值分别为: $P=25.525 \mu\text{m}$ (周期), $\Delta\theta=0.4 \pi$ (相位差), $A_1=3.184$ (光路 1 幅值), $A_2=1.125$ (光路 2 幅值)。

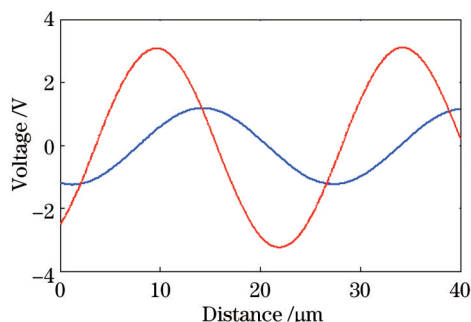


图 5 两支光路的电压输出波形

Fig.5 Two optical paths energy output voltage

由图5可知,探测的焦面位置信号变化成周期变化,而此检焦方法无法确定周期数,所以此检焦装置的行程为 $P/2=12\ \mu\text{m}$ (P 为标记光栅的周期)。

驱动高精度闭环控制的压电陶瓷(PZT),步长为 $50\ \text{nm}$,分别在 $1\sim 1.45\ \mu\text{m}$ 处、 $8.05\sim 8.5\ \mu\text{m}$ 处测得压电陶瓷读数和利用此检焦方法求得焦面位置读数,如表1和表2所示。根据表中的数据,得到的均方根分别为 $0.0052\ \mu\text{m}$ (表1)和 $0.0064\ \mu\text{m}$ (表2),能满足高分辨力光刻机 $10\ \text{nm}$ 的调焦精度要求。

表1 $1\sim 1.45\ \mu\text{m}$ 位置的检测数据

Table 1 Test data of $1\sim 1.45\ \mu\text{m}$

Step length / μm	PZT data / μm	Focusing data / μm	Difference between PZT data and focusing data / μm
0.05	1.001	1.006	-0.005
0.05	1.051	1.05766	-0.00666
0.05	1.1019	1.106302	-0.0044
0.05	1.1528	1.15707	-0.00427
0.05	1.2049	1.210461	-0.00556
0.05	1.2541	1.259115	-0.00501
0.05	1.3042	1.29886	0.00534
0.05	1.354	1.350739	0.003261
0.05	1.4016	1.398445	0.003155
0.05	1.4528	1.456926	-0.00413

表2 $8.05\sim 8.5\ \mu\text{m}$ 位置的检测数据

Table 2 Test data of $8.05\sim 8.5\ \mu\text{m}$

Step length / μm	PZT data / μm	Focusing data / μm	Difference between PZT data and focusing data / μm
0.05	8.0525	8.047088	0.005412
0.05	8.1004	8.101317	-0.00092
0.05	8.1528	8.158353	-0.00555
0.05	8.2043	8.210291	-0.00599
0.05	8.2523	8.265787	-0.01349
0.05	8.303	8.299968	0.003032
0.05	8.3551	8.360886	-0.00579
0.05	8.399	8.404526	-0.00553
0.05	8.4551	8.451337	0.003763
0.05	8.5034	8.502777	0.000623

图6为在同一位置不同时间对其焦面位置探测得到的数据。从图中数据可以看出此方法能实现 $\pm 5\ \text{nm}$ 的检焦稳定性。

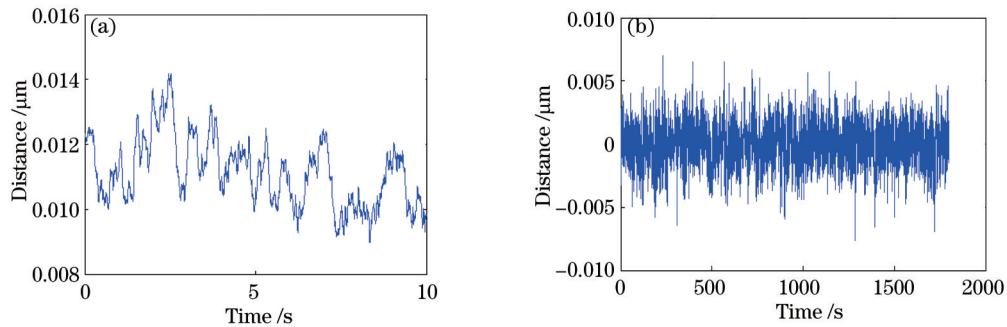


图6 焦面位移变化。(a)时间为5 s检测的焦面位移波形图;(b)时间为30 s检测的焦面位移波形

Fig.6 Waveform of wafer surface displacement. (a) Waveform of wafer surface displacement of 5 seconds; (b) waveform of wafer surface displacement of 30 seconds

5 结 论

介绍了一种叠栅条纹相位解析的纳米检焦方法,分析了检焦测量原理及基于叠栅条纹相位解析的检焦系统组成,进行了叠栅条纹的光强调制的理论分析,在实际实验过程中,针对具体情况,对其参数进行标定;对实验数据的分析证明该方法可用于调焦精度为 10 nm 的高分辨力光刻机。

参 考 文 献

- 1 Yao Hanming, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Lithography for Micro and Nano-Fabrication[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. 1-5.
姚汉明, 胡 松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006. 1-5.
- 2 Wang Yangyuan, Kang Jinfeng. Development and challenges of lithography for ULSI [J]. Chinese J Semiconductors, 2002, 23(3): 225-237.
王阳元, 康晋峰. 硅集成电路光刻技术的发展与挑战[J]. 半导体学报, 2002, 23(3): 225-237.
- 3 Yoshitada Oshida, M Tanaka, T Tanimoto, *et al.*. Chip leveling and focusing with laser interferometry [C]. SPIE, 1990, 1264: 244-251.
- 4 Masahiro Watanabe, Y Oshida, Y Nakayama, *et al.*. Focusing and leveling based on wafer surface profile detection with interferometry [C]. SPIE, 1994, 2197: 980-989.
- 5 Shaolin Zhou, Yong Yang, Lixin Zhao, *et al.*. Tilt-modulated spatial phase imaging method for wafer-mask leveling in proximity lithography [J]. Opt Lett, 2010, 35(18): 3132-3134.
- 6 Yan Wei, Li Yanli, Chen Mingyong, *et al.*. Moire fringe-based focusing-test scheme for optical projection lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0805001.
严 伟, 李艳丽, 陈铭勇, 等. 基于光栅叠栅条纹的纳米检焦方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0805001.
- 7 Li Jinlong, Hu Song, Zhao Lixin. Control technique of wafer surface in dual stage lithographic system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1223002.
李金龙, 胡 松, 赵立新. 双工件台光刻机中的焦面控制技术[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1223002.
- 8 Jianming Hu, Aijun Zeng, Xiangzhao Wang. A position sensor based on grating projection with spatial filtering and polarization modulation [J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(1): 18-20.
- 9 D Goldstein. Polarized Light [M]. New York: Marcel Dekker, Inc. , 2003.
- 10 Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508006.
李 杰, 唐 锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508006.
- 11 Cao Shaoqian, Bu Yang, Wang Xiangzhao, *et al.*. Measurement technique for the Mueller matrix based on a single photo-elastic modulator [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0112006.
曹绍谦, 步 扬, 王向朝, 等. 基于单光弹调制器的米勒矩阵测量技术[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0112006.
- 12 A D Martino, Y K Kim, E Garcia-Caurel, *et al.*. Optimized Mueller polarimeter with liquid crystals [J]. Opt Lett, 2003, 28(8): 616-618.
- 13 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Optical design of lithography projective lens with variable total track [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416003.
蔡燕民, 王向朝, 黄慧杰. 共轭距可变的光刻投影物镜光学设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416003.

栏目编辑: 何卓铭