

基于光闸叠栅条纹的纳米检焦方法

严 伟 李艳丽 陈铭勇 王 建

(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 针对投影光刻机短波长、大数值孔径、短焦深的特点, 讨论了一种基于光闸叠栅条纹的纳米检焦方法。该方法采用三角测量的基本原理, 利用双光栅光闸叠栅条纹的光强调制机理, 并结合像横向剪切器和光弹调制的光学特性, 建立了单个光栅周期内焦面位移量和输出光能量线性关系。其具有非接触、强实时性和高稳健性的特点, 经理论分析和模拟测试, 达到纳米量级的检测精度, 可以满足投影光刻高精度、实时、非接触焦面测量的要求。

关键词 光学测量; 焦面检测; 叠栅条纹; 光弹调制; 横向剪切分束器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0805001

Moiré Fringe-Based Focusing-Test Scheme for Optical Projection Lithography

Yan Wei Li Yanli Chen Mingyong Wang Jian

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

Abstract Based on the short wavelength, large numerical aperture, and short focal depth of optical projection lithography, a focusing method is presented based on Moiré fringe and the principle of triangulation. By analyzing the optical properties of photoelastic modulation and Savart plate, combining the intensity modulation mechanism of dual-grating Moiré fringes, the linear relation between focal plane displacement and output light energy is established in a single grating period. After theoretical analysis and simulated test, it shows precision at nanometer scale with the property of non-contacting, high robustness and well time efficiency, meeting the demands of focusing test in projection lithography.

Key words optical measurement; focusing test; Moiré fringe; photoelastic modulation; Savart plate

OCIS codes 050.2770; 050.5080; 050.1950

1 引 言

目前,随着大规模及超大规模集成电路的不断发展,应用大数值孔径投影光刻物镜和短波长曝光光源,使得投影光刻分辨率不断被突破。同时,为了降低生产成本和提高生产效率,硅片尺寸已经从传统的2, 4 inch(1 inch=2.54 cm)过渡到8, 12 inch,甚至超大面积曝光。分辨率的提高直接导致有效焦距的急剧下降;另外,硅片尺寸的增大又带来了曝光面积的大幅增加,从而导致离焦量的进一步恶化(整个超大曝光视场局部倾斜造成的离焦,工件台运动过程中偏摆带来的局部倾斜影响);同时,其他离焦误差源

(硅片的翘曲,衬底的地形,抗蚀剂自身的厚度等)并未减小,这都使得调焦裕量大幅度萎缩,更是对检焦系统提出纳米量级高精度检测的苛刻要求。因此,如果不实现纳米检焦和控制,势必造成某些曝光区域产生较大范围的离焦误差,这些都将严重影响曝光线条质量和集成电路成品率^[1~3]。针对检焦精度要求较低的情况,大多采用结构原理较为简单的狭缝光度式焦面检测方法,可以满足亚微米量级精度要求的场合;而针对纳米量级的焦面检测,发展了激光干涉检焦技术^[4,5]、基于泰伯效应的叠栅条纹法^[6~8]以及基于光弹调制的方法^[9~18]。激光干涉检

收稿日期: 2011-03-09; 收到修改稿日期: 2011-03-30

作者简介: 严 伟(1977—),男,博士研究生,副研究员,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: yanwei@ioe.ac.cn

导师简介: 胡 松(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事微电子装备集成、微细加工技术及精密测量等方面的研究。E-mail: husong@ioe.ac.cn

焦技术不能抑制硅片工艺层引起的薄膜干涉,并且干涉光路非常容易受环境的影响;泰伯效应的叠栅条纹法在接触接近式光刻设备中具有明显优势,非常适合掩模硅片间小间隙的测量,但对于投影光刻机,目前主流的精确检焦仍旧采用光弹调制的检焦方式。

本文基于双光栅光闸叠栅条纹形成机理,讨论检焦基本原理,模拟硅片加速、匀速和静止状态,调制光强变化波形,并建立了单个光栅周期内焦面位移与光强线性关系,最后综合分析该方法所能到达的理论测量精度和诸多误差影响因素。

2 检焦基本原理

整个检焦系统如图 1 所示,该系统由照明系统,标记光栅 G2,远心成像系统 L1 和 L2,像剪切系统,检测光栅 G1,光弹调制系统和光电探测单元共同组成。硅片平移量为

$$\Delta z = \frac{\sin \gamma}{\sin 2\gamma} \Delta x, \quad (1)$$

式中 $\pi/2 - \gamma$ 是入射角, Δx 是标记光栅 G2 像的平

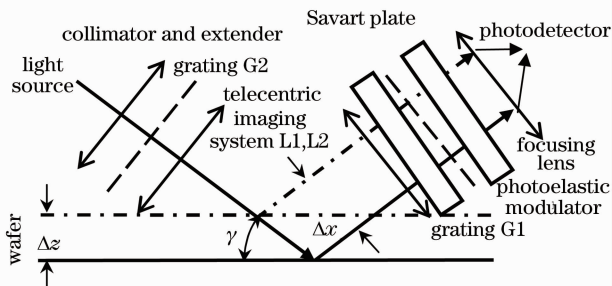


图 1 检焦方法基本原理

Fig. 1 Principle of focusing test method

移量。

照明采用对光刻不感光的宽光谱光源(卤素灯:峰值波长 850 nm,谱线主要宽度 400~1100 nm,用于抑制由于硅片表面工艺层薄膜干涉对成像的影响),经扩束后由光纤引入光路,经过扩束准直系统均匀照明标记光栅 G1,标记光栅经远心成像系统 L1 成像在硅片面(入射角 84°),被反射后经过由远心成像系统 L2、以及横向剪切(Savart)板形成干涉图样和目标像。Savart 板的作用是把衍射光分切为偏振方向相互垂直的 o 光和 e 光,这样出现两组相互错位的正弦分布光束,其偏振态互相垂直,并且被检测光栅 G1 调制,硅片焦面位置的移动引起调制光强的正弦变化,通过光电探测和电路解调后,可确定离焦状态。这个光强变化信号是低频的,而经过光弹调制器组件的处理,相当于增加一个高频载波,这大大加强了焦面检测的抗干扰和抗噪声的能力。

根据三角测量的基本原理,当光掠入射时硅片高度变化时,标记光栅 G2 的像会垂直光轴平移。此时,标记光栅 G2 与检测光栅 G1 产生光闸叠栅条纹现象,如果通过光电探测单元可获得双光栅调制光强,最后通过能量变换反演出硅片位置变化量。该系统中,远心成像系统 L1 和 L2 保证标记光栅 G2 以 1:1 成像于检测光栅 G1 表面。

3 双光栅光闸叠栅条纹的光强调制机理

首先,从如图 2 所示的双光栅结构开始讨论。假设检测光栅 G₁ 的光栅常数为 p_1 , 占空比为 1, 则光栅透射率可以表示为

$$T_1(x_1) = \begin{cases} 1, & Np_1 - \frac{p_1}{2} \leq x_1 \leq Np_1 + \frac{p_1}{2} \\ 0, & x_1 \leq Np_1 - \frac{p_1}{2}, x_1 \geq Np_1 + \frac{p_1}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $N = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, N$ 是从 $x_2 = 0$ 起算的栅线序号。(2) 式是一个周期偶函数,周期为 p_1 , 可展为傅里叶级数为

$$T_1(x_1) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp\left(i \frac{2\pi n x_1}{p_1}\right), \quad A_n = \frac{1}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right). \quad (3)$$

系统中,标记光栅 G₂ 光栅常数为 p_2 , 占空比为 1, 则总的透射率函数 T 是 T_2 和 T_1 的乘积:

$$T(x_1, x_2) = T_1(x_1) T_2(x_2) = \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp\left(i \frac{2\pi n x_1}{p_1}\right) \right] \left\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left[i \frac{2\pi n (2x_1 - x_2)}{p_2}\right] \right\}. \quad (4)$$

两块光栅相对移动过程中,产生的条纹其主要成分是光强空间分布的基波和最低频率部分,略去(4)式的高频项,得

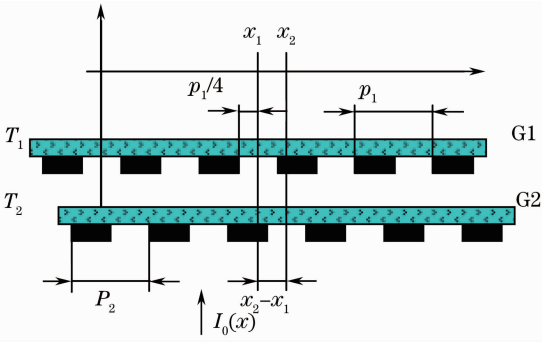


图2 双光栅透射率示意图

Fig. 2 Transmittance of dual-grating

$$T(x_1, x_2) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n B_n \exp \left[i 2 \pi n \left(\frac{x_1}{p_1} - \frac{2x_1 - x_2}{p_2} \right) \right]. \quad (5)$$

当有一均匀的平行光 I_0 照明后,由于光路的对称性,标记光栅将在检测光栅 G1 平面成像,并被 G1 调制,令 $p_1 = p_2 = p$,同时令 $\Delta x = x_2 - x_1$,又因为检测光栅 G1 不动,则透过检测光栅 G1 的总光强度为

$$I(\Delta x) = I_0 T(x_1, x_2) = I_0 \left\{ \frac{1}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{+\infty} \left[\frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi/2} \right]^2 \cos \left(2\pi n \frac{x_2 - x_1}{p} \right) \right\} \approx I_0 \left[\frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \cos \left(\frac{2\pi\Delta x}{p} \right) \right]. \quad (6)$$

由(6)式可见,透过检测光栅的光强随标记光栅位置不同而产生余弦变化,Savart 板把线偏振的光剪切成错位的两束正交偏振光,即 o 光和 e 光,如图 3 所示,通过检测光栅后,两束光的强度分别为

$$\begin{cases} I_o(\Delta x) = \frac{I_0}{2} \left\{ \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \cos \left[\frac{2\pi(\Delta x - s)}{p} \right] \right\}, \\ I_e(\Delta x) = \frac{I_0}{2} \left\{ \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \cos \left[\frac{2\pi(\Delta x + s)}{p} \right] \right\}, \end{cases} \quad (7)$$

式中, $2s$ 为 Savart 板剪切量。

下面分析这两束偏振方向互相垂直的线偏振光穿越调制器组件后探测器接收到的光强信号。如图 4 所示,排列调制器组件中的光学件,将所有光学元件利用琼斯矩阵表达,运算后分别获得 o 光和 e 光时域调制能量为

$$\begin{cases} I_e(\Delta x, \delta) = \sqrt{I_e(\Delta x)} \cos \frac{\delta}{2} \sin 45^\circ + \sqrt{I_e(\Delta x)} \sin \frac{\delta}{2} \cos 45^\circ = \frac{I_e(\Delta x)}{2} (1 + \sin \delta), \\ I_o(\Delta x, \delta) = -\sqrt{I_o(\Delta x)} \sin \frac{\delta}{2} \sin 45^\circ + \sqrt{I_o(\Delta x)} \cos \frac{\delta}{2} \cos 45^\circ = \frac{I_o(\Delta x)}{2} (1 - \sin \delta), \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\delta = (\pi/2) \sin(2\pi ft)$,为调制器光学头对光束产生的相位差,探测器并不能区分光束的偏振态,只接收总能量,所以

$$\begin{aligned} I_d &= I_e(\Delta x, \delta) + I_o(\Delta x, \delta) = \frac{I_e(\Delta x)}{2} (1 + \sin \delta) + \frac{I_o(\Delta x)}{2} (1 - \sin \delta) = \\ &= \frac{I_e(\Delta x) + I_o(\Delta x)}{2} + \frac{I_e(\Delta x) - I_o(\Delta x)}{2} \sin \delta. \end{aligned} \quad (9)$$

将(6)式代入(9)式中,推导后可得

$$I_d = \frac{I_0}{2} \left(\frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \cos \frac{2\pi\Delta x}{p} \cos \frac{2\pi s}{p} \right) + \frac{I_0}{2} \left(-\frac{2}{\pi^2} \sin \frac{2\pi\Delta x}{p} \sin \frac{2\pi s}{p} \right) \times \sin \left[\frac{\pi}{2} \sin(2\pi ft) \right]. \quad (10)$$

由(10)式可见,光弹调制器只对第二项有影响,并且两项均受 Savart 板的剪切量作用。显然,当第一项为一常数,第二项中 $\sin(2\pi s/p) = 1$ 时,信噪比最佳,有 $2\pi s/p = \pi/2, s = p/4$,所以 Savart 板剪切量 $2s = 2p/4 = p/2$ 。取 Savart 板的剪切量 $2s = p/2$, (10)式简化为

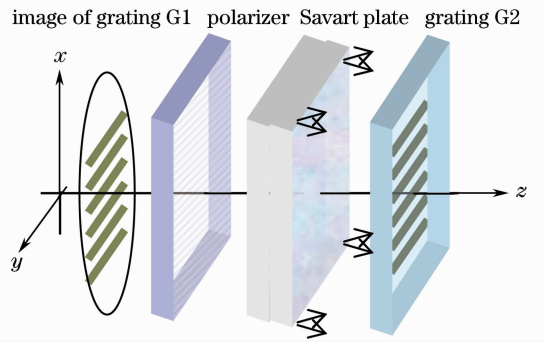


图3 Savart 像剪切光学系统

Fig. 3 Savart image shearing optical system

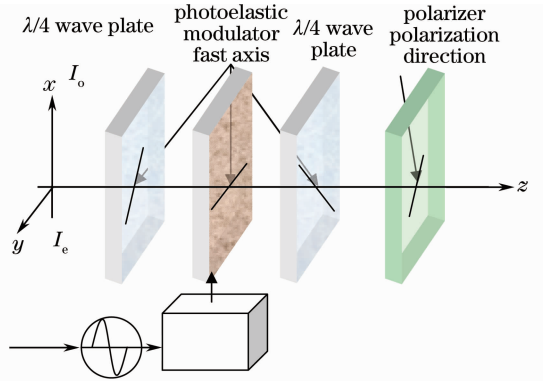


图4 光弹调制光学系统

Fig. 4 Optical system based on photoelastic modulator

$$I_d = \frac{I_0}{8} - I_0 \frac{1}{\pi^2} \sin \frac{2\pi\Delta x}{p} \sin \left[\frac{\pi}{2} \sin(2\pi ft) \right]. \quad (11)$$

4 模拟分析

调焦信号通过检偏器后成像在光电探测器上,探测器接收到的光信号为交替通过的 o 光和 e 光,调制频率 50 kHz。根据(1)式和(11)式,硅片在 z 轴的移动引起光强的变化,这个变化信号是低频的,而经过光学调制器组件的处理,相当于增加了一个高频载波,可以加强检焦系统抗干扰和抗噪声能力,使检焦精度大大提高。现仅对交流分量分析模拟,

该光电信号放大后再通过解调可以获得如图 5 所示的电平信号以及解调滤波后的波形。

通过以上分析,建立了单周期内焦面位移与光强信号线性对应关系,并分别模拟了硅片匀速移动、加速移动和静止在 4 中不同位置时的能量输出波形,如图 5 中(a),(c),(e)所示,图 5 中(b),(d),(f)是对应的解调波形。如果通过电路系统调节和分解探测信号的直流分量和交流信号的振幅就可以求出 Δx 的大小为

$$\Delta x = \frac{p}{2} \times \frac{V_{AC}}{2V_{DC}} = \frac{pV_{AC}}{4V_{DC}}. \quad (12)$$

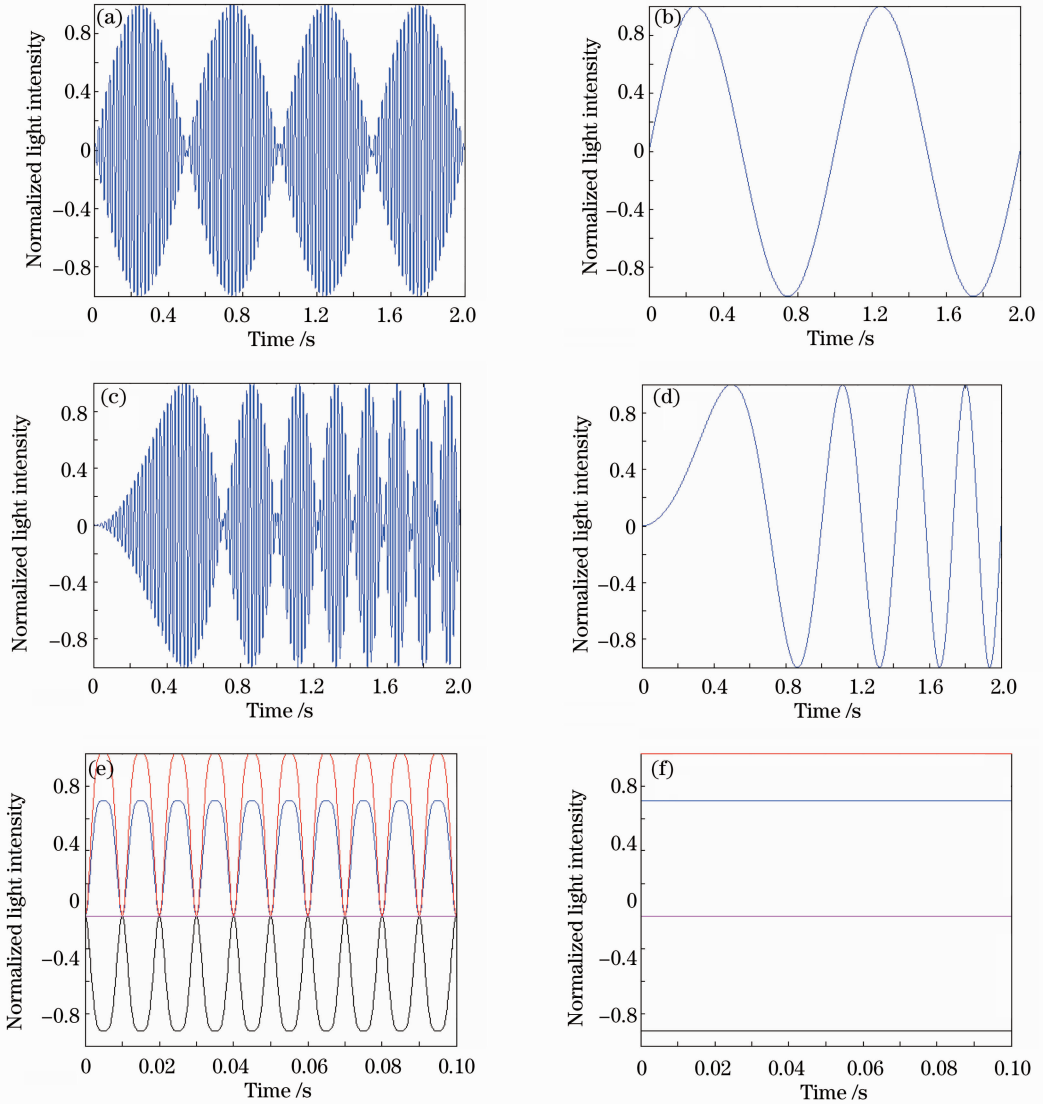


图 5 o 光、e 光能量输出模拟波形和解调滤波波形。(a) 硅片匀速移动时能量输出波形及(b)解调后的能量输出波形; (c) 硅片加速移动时能量输出波形及(d)解调后的能量输出波形; (e) 硅片静止在三个位置时能量输出波形及(f)解调后的能量输出波形

Fig. 5 o light, e light energy output waveform and demodulated filtered waveform. (a) Wafer constant speed and (b) demodulated waveform; (c) wafer acceleration and (d) demodulated waveform; (e) wafer located at three different positions and (f) demodulated waveform

当光斜入射时,依据硅片的运动距离 Δz 和偏移量 Δx 的关系。可求出硅片或投影物镜的 z 向位置,

$$z = \pm \frac{\rho V_{AC}}{8V_{DC}}, \quad (13)$$

z 的正负由 $V_{DC} - V_{AC}$ 的符号确定。

如果电路系统将 V_{DC} 调节 10V, $V_{AC} = V_{DC} \pm 10$ V, 并采用 12 位的模数转换, 其测量精度为

$$z = \pm \frac{\rho V_{AC}}{8V_{DC}} = \frac{50 \mu\text{m} \times 20 \text{ V}}{8 \times 10 \text{ V} \times 2^{12}} \approx \pm 3.052 \text{ nm}. \quad (14)$$

5 结 论

讨论了一种基于光闸叠栅条纹的纳米检焦方法,在不考虑误差影响的条件下,该方法具有纳米量级的精度。该方法还具有非接触、实时性和稳健性强的特点,将方法应用到投影光刻机,可以针对每一曝光场进行调焦调平,动态检测曝光场区域的表面倾斜和翘曲,实时调焦调平,将补偿工件台运动和各层抗蚀剂表面曲率差异,平均了整个视场的焦面,因而将大大提高调焦调平精度,使其现有焦深可被充分利用,最终有效提高曝光质量和成品率。

但整个检焦系统受到原理误差、光学系统中光学器件带来的误差、光强测量方面的误差、加工制造误差、环境噪声等诸多因素的综合影响。这些误差中有些是系统误差,在测量系统装调后将基本保持不变或在测量结果中有一定的表现形式,因此所造成的影响可通过数据处理方法剔除掉。该系统中大部分误差属于影响比较严重的不能通过数据处理方法剔除的误差,因此还必须通过误差分析评价模型来评价各种误差对整个测量范围内所带来的影响,并采用相应的方法和措施加以消除。

参 考 文 献

- 1 ITRS organization. International Technology Roadmap for Semiconductors [OL]: [2011-06-03]. <http://www.itrs.net/>
- 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, 2002, 23(3): 225~237
- 3 K. Suzuki, S. Wakamoto, K. Nichi `et al.. KrF step-and-scan exposure system using higher-NA projection lens [C]. *SPIE*, 1996, 2726: 767~779
- 4 Yoshitada Oshida. Chip leveling and focusing with laser interferometry [C]. *SPIE*, 1990, 1264: 244~251
- 5 Masahiro Watanabe. Focusing and leveling based on wafer surface profile detection with interferometry [C]. *SPIE*, 1994, 2197: 809~989
- 6 S. Zhou, Y. Fu, X. Tang et al.. Fourier-based analysis of Moiré fringe patterns of superposed gratings in alignment of nanolithography [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(11): 7869~7880
- 7 Wei Yan, Yong Yang, Wangfu Chen et al.. Moiré based focusing and leveling scheme for optical projection lithography [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(31): G1~G5
- 8 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
- 9 Wangfu Chen, Wei Yan, Song Hu et al.. Extended dual-grating alignment method for optical projection lithography [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(4): 708~713
- 10 D. H. Kim, B. H. Nam, K. H. Lee et al.. Probe beam scan type auto-focus system using position sensing detector for sub-half micron lithography tools [C]. *SPIE*, 1996, 2726: 876~885
- 11 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
- 12 J. E. Vanderwerf. Optical focus and level sensor for wafer steppers [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1992, 10(2): 735~740
- 13 E. E. M. Rajesh Menon, Mark K. Mondol, Fernando J. Castaño et al.. Scanning-spatial-phase alignment for zone-plate-array lithography [J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2004, 22(6): 3382~3385
- 14 T. Huang, S. Liu, P. Yi et al.. Focusing and leveling system for optical lithography using linear CCD [C]. *SPIE*, 2009, 7160: 71602X
- 15 Li Xiaoping, Chen Feibiao. Measurement model of focusing and leveling measurement system for projection lithography tool [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(11): 1987~1991
- 李小平,陈飞彪. 投影光刻机硅片调焦调平测量模型 [J]. 光学学报, 2007, 27(11): 1987~1991
- 16 S. Wittekoek, M. van den Brink, H. Linders et al.. Deep UV wafer stepper with through the lens wafer to reticle alignment [C]. *SPIE*, 1990, 1264: 534~547
- 17 D. Kim, W.-I. Jang, B. Y. Choi et al.. Focusing and leveling system using position-sensitive detectors for the wafer steppers [C]. *SPIE*, 1994, 2197: 997~1003
- 18 X. Li, F. Chen, Z. Li. Simulation on signal processing of focusing and leveling measurement system [C]. *SPIE*, 2007, 6724: 67241R