

文章编号:1002-2082 (2021) 04-0703-06

基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法

胡乔伟¹, 高志山¹, 袁 群¹, 黄 旭¹, 孙一峰¹, 王灵杰², 张建萍²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实时准确地将激光直写系统中经直写物镜聚焦的光斑定位于待加工元件表面, 提出了一种基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法, 实现了对离焦量的实时检测与调整。在直写系统中引入检焦光路, 与直写光路共享同一物镜, 构建 Linnik 型同步相移显微干涉检焦系统, 提取包含离焦量的波面相位信息; 再从大数值孔径 (NA) 的物镜波像差数据中解析出离焦量的大小与方向。仿真结果验证了基于波像差判据的离焦计算方法的正确性, $NA \geq 0.5$ 时, 离焦探测灵敏度可达 4 nm, 通过实验验证了同步相移显微干涉检焦方法的可行性, 检焦精度可达 10 nm 以内, 满足激光直写高精度的测量要求。

关键词: 实时检测; 同步相移; 显微干涉; 波像差; 离焦量

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0403002](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403002)

Synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria

HU Qiaowei¹, GAO Zhishan¹, YUAN Qun¹, HUANG Xu¹,
SUN Yifeng¹, WANG Lingjie², ZHANG Jianping²

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to accurately locate the focused spot of the laser direct writing system on the surface of the element to be machined in real time, a synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method based on wave aberration criteria was proposed, which realized the real-time detection and adjustment of the defocusing amount. The focal detection optical path was introduced in the direct writing system, and shared the same objective lens with the direct writing optical path. The Linnik synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection system was constructed to extract the wave surface phase information containing the defocusing amount. Then the magnitude and direction of defocusing amount was analyzed from the wave aberration data of objective lens with large numerical aperture (NA). The simulation results verify the correctness of defocusing calculation method based on wave aberration criteria, when $NA \geq 0.5$, the defocusing detection sensitivity can reach to 4 nm. The experimental results verify the feasibility of synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection method, and the precision can reach within 10 nm, which can meet the high-precision measurement requirements of laser direct writing.

Key words: real-time detection; synchronous phase-shifting; microscopic interference; wave aberration; defocusing amount

收稿日期:2021-02-07; 修回日期:2021-03-25

基金项目:国家重点研发计划 (2019YFB2005500); 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室开放基金 (KLOM190201); 江苏省六大人才高峰项目 (RJFW-019)

作者简介:胡乔伟 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事显微干涉测量研究。E-mail: 13915134708@163.com

通信作者:袁群 (1985—), 男, 博士, 教授, 主要从事先进光学设计与光学计量测试研究。E-mail: yuanqun@njust.edu.cn

引言

激光直写技术是光刻母版衍射光学元件生产的重要工艺技术之一^[1]。随着光刻工艺制造的要求不断提高,对于激光直写技术核心部件激光聚焦系统的写入精度有很高的要求^[2]。为了提高精度,减小直写波长^[3]和增大物镜的数值孔径^[4]是2个有效的方法。目前,激光直写波长已经从He-Cd激光的442 nm^[5]发展到了深紫外(deep ultraviolet, DUV)^[6]的193 nm,而光刻物镜的数值孔径也从0.3^[7]提高到0.8^[8]。随着物镜NA的增大,物镜焦深也在不断变小^[9],并且随着微光学元件表面的尺寸扩大^[10]和复杂度加深^[11],使得检焦变得更难。检焦光路负责将直写物镜焦点定位于曝光平面,指导直写波长下的聚焦激光束,在每一次直写前进行实时检焦及焦点调整。

目前的同轴检焦方法主要有像散法^[12]和临界角法^[13]等。2001年,美国亚利桑那州立大学的Fan K-C等人提出了物镜数值孔径NA为0.45、检焦波长为780 nm情况下的像散法自动检焦方法^[14]。像散法是利用像散元件与四象限探测器对输出信号分析计算进行离焦的判断,对焦范围为200 μm,检測精度为0.2 μm,该方法对焦范围较大但检焦精度较低。2011年,长春光机所梁凤超等人提出了基于临界角法的激光直写调焦伺服技术,其NA为0.42、检焦波长为632.8 nm^[15]。利用非临界角的光斑不均匀性与二象限探测器解析离焦量,其对焦范围为10 μm,检焦精度为80 nm。当前国内较为先进的257 nm激光直写机对于检焦精度的要求在25 nm以内。

现有方法虽能实现对离焦量的检测,但由于直写波长与检焦波长差异越来越大,对于物镜在不同工作波长下的像差校正难度越来越大。因此需要设计一种新的方法,减小由于物镜自身像差带来的检测误差问题;另一方面,干涉检测的灵敏度很高,将其用于检焦,可以实现纳米量级的检焦精度,现有检焦方法虽然对焦范围大,但检测精度较低,适用于粗调焦。因此,本文提出了一种基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法,利用其波像差检测灵敏度高、同步相移实时性强等优点,将采集得到的同步相移干涉图解调出显微物镜的干涉波像差信息,再从大数值孔径(NA)的显微物镜波像差数据中解析出离焦量的大小与方向,可以实现高精度以及实时的焦面探测。

1 检焦原理

1.1 检焦工作原理

限于篇幅,本文仅聚焦检焦波长的检焦精度和方法讨论。同步相移显微干涉检焦系统,通过对显微物镜的光瞳波像差的探测与分析来实现离焦量的检测,在激光直写系统使用的物镜数值孔径为大数值孔径(NA)时,如测试臂中样品表面偏离物镜焦点时,则在波像差中不仅会引入离焦量,还会引入初级球差和高阶球差。

如图1所示,为离焦量S与波面关系的模型。当样品表面没有位于焦点O₁时,此时参考点O₂距离波面焦点O₁有轴向偏移量S,即离焦量S,分别将O₂与P之间的距离和O₁与P之间的距离记作O₂P与O₁P,则两点之间光程差可以表示为

$$\Delta l = O_2 P - O_1 P = \sqrt{x^2 + y^2 + (R - z + S)^2} - R = \\ R \left(\sqrt{1 + \frac{2S}{R^2}(R - z) + \frac{S^2}{R^2}} - 1 \right) \quad (1)$$

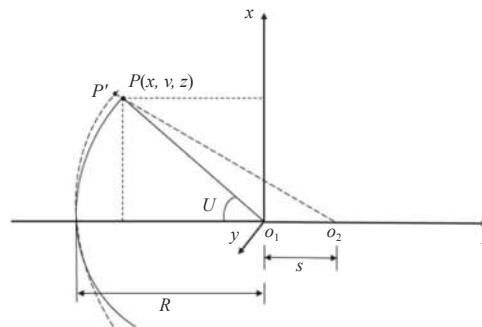


图1 离焦量S与波面关系模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of relationship model between defocusing amount S and wave surface

由于离焦量S相较于R较小,所以 S^2/R^2 可以忽略不计,则波像差可以化为

$$\Delta l \approx S \frac{R - z}{R} = S \cos U \quad (2)$$

式中:U为考察点的孔径角,其与整个口径球面波的NA之间的关系可表示为

$$\sin U = \rho NA \quad (3)$$

式中,ρ为归一化波面极坐标。

结合(2)式和(3)式可以得到,待测元件离焦所引入的波像差 $W_s(x, y)$ 可以表示为

$$W_s(x, y) = S \sqrt{1 - \rho^2 NA^2} = S (1 - \rho^2 NA^2/2 - \rho^4 NA^4/8 - \rho^6 NA^6/16 - 5\rho^8 NA^8/128 - \dots) \quad (4)$$

由(4)式可知,样品表面所在表面离焦所导致的波像差主要由离焦量S和球面波的NA决定,波

面误差中包含着离焦项和球差项, 用 37 项 Zernike 条纹多项式对波面进行拟合可得

$$W_S(x, y) = a_4 Z_4 + a_9 Z_9 + a_{16} Z_{16} + a_{25} Z_{25} + a_{36} Z_{36} \quad (5)$$

式中: Z_4 为离焦项; Z_9 、 Z_{16} 、 Z_{25} 和 Z_{36} 分别为初级球差项、二阶球差项、三阶球差项和四阶球差项; a_4 、 a_9 、 a_{16} 、 a_{25} 和 a_{36} 分别为对应的泽尼克多项式系数。结合(4)式和(5)式, 可以建立离焦项系数 Z_4 与离焦量 S 以及 NA 之间的关系式为

$$Z_4 = S \left(\frac{1}{2} NA^2 + \frac{1}{12} NA^4 + \frac{9}{160} NA^6 + \frac{1}{32} NA^8 + O(NA) \right) \quad (6)$$

1.2 检焦系统光路设计

本文设计的检焦系统光路如图 2 所示。He-Ne 激光器发出一束波长为 632.8 nm 的线偏振光, 经过扩束准直系统后, 平行光出射至偏振分光棱镜, 分成了两束振动方向相互正交的透射光 P 光和反射光 S 光。返回的两束光再次经过偏振分光棱镜、分光棱镜透射通过 $\lambda/4$ 波片, 此时, 参考光与测试光变成左旋与右旋圆偏振光, 两束光经过共焦放置的 2 片透镜, 最后成像在微偏振片阵列相机靶面上, 经过微偏振阵列后的两束光产生干涉, 分别产生了恒定的 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 和的相位差, 通过四步相移算法获得波像差。

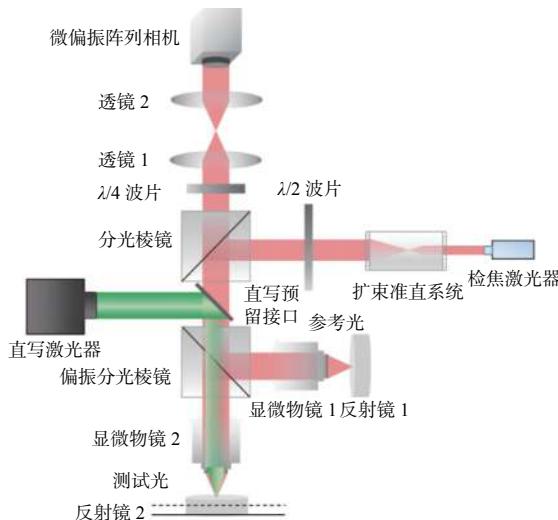


图 2 同步相移显微干涉检焦系统光路图

Fig. 2 Optical path diagram of synchronous phase-shifting microscopic interference focal detection system

2 实验与分析

2.1 参考臂与测试臂物镜差异标定

Linnik 型显微干涉系统的优点在于在参考臂中加入了与测试臂参数完全相同的显微物镜, 减

小了物镜误差给检焦带来的影响, 但是 2 个物镜在光学特性上依然会存在一定的差异, 因此需要测量显微物镜之间的波像差, 从而在实际检焦时对由于显微物镜差异带来的误差进行补偿。如图 3 所示, 图 3(a) 为参考臂物镜波像差, 其 PV=0.422 λ , RMS=0.054 λ ; 图 3(b) 为测试臂物镜波像差, 其 PV=0.409 λ , RMS=0.048 λ ; 图 3(c) 为 2 个物镜之间的旋转对称项成分的误差, 其 PV=0.0149 λ , RMS=0.0033 λ , 该成分的误差将会在实际检焦时的干涉波像差中被消除。

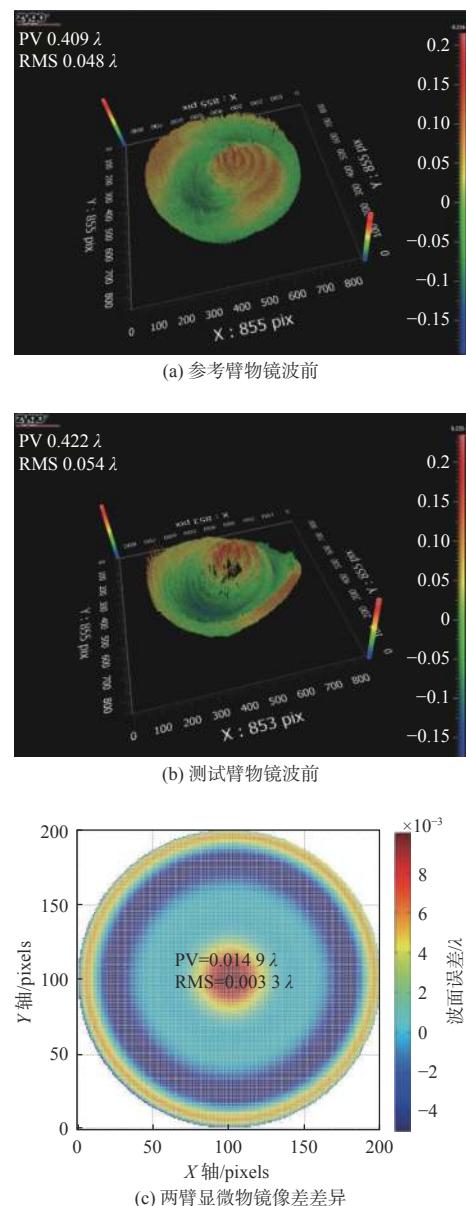


图 3 两个显微物镜波面对比

Fig. 3 Comparison of wave surfaces of two micro-objectives

2.2 基于波像差判据的检焦方法仿真分析

为了验证基于波像差判据的检焦方法的可行

性与检测精度,采用 NA 为 0.5 的显微物镜,波长为 632.8 nm,在 Zemax 光学设计软件中对其进行仿真。当离焦量 S 在显微物镜有效焦深范围内(-500 nm, 500 nm)变化时,得到的离焦量值与实际离焦量的值之间误差曲线如图 4 所示。由图 4 可知,当离焦量在有效焦深内变化时,误差在 3 nm 以内变化,其误差主要来源于在处理仿真得到的波面数据时,为了与实验得到的波面分辨率保持一致,缩小了分辨率,导致了对波面进行拟合时产生了误差,据此可得基于波像差判据的检焦算法精度已经可以达到纳米级。

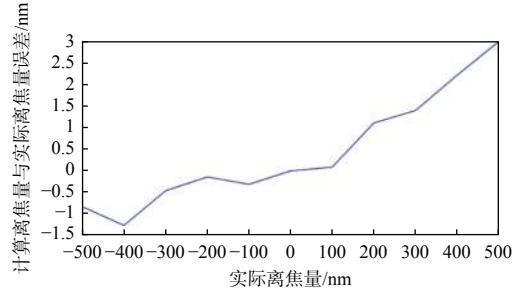


图 4 离焦量的检测误差

Fig. 4 Detection error of defocusing amount

同时该检焦算法是根据波像差的变化来判断离焦量,因此对离焦量的探测灵敏度依赖于波像差的检测灵敏度,而对于干涉系统来说,通常其检测灵敏度为 $\lambda/1000$,根据(5)式离焦量与干涉波像差之间的关系,可得其在 $NA=0.5$ 时,离焦探测灵敏度为 4 nm。为了验证该离焦探测灵敏度的正确性,设置离焦量为 4 nm,得到其干涉波像差 PV 值为 0.002λ ,但是在实际测量时,受干涉仪波像差检测灵敏度影响,检焦灵敏度会略低于理论值 4 nm。

2.3 实验结果与分析

根据上述计算方法,在离焦位置处采集同步相移干涉图,测得其干涉波像差并解耦出离焦量,再驱动高精度的压电陶瓷微位移器(PZT)根据离焦量的大小与方向调整至准焦面。

离焦检测结果,如图 5 所示,分别为待测面离焦时同步相移干涉图 5(a);解包相位得到的包含离焦量信息的波面图 5(b);37 项 Zernike 条纹多项式拟合重构的完整波面图 5(c);离焦项与球差项重构的波面图 5(d)。其中 z 轴为波面相位,此时,离焦项与球差项拟合波面 PV 值为 0.05λ , RMS= 0.013λ 。

将此时对干涉波像差拟合出的离焦系数 -0.0421 以及 $NA=0.5$ 代入(6)式计算得到离焦量

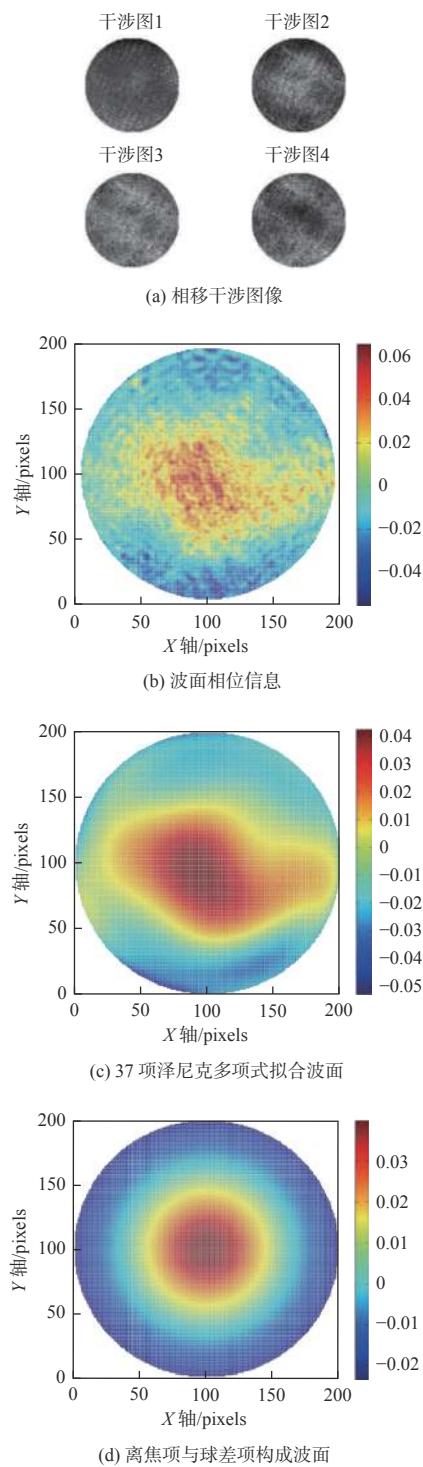


图 5 离焦检测结果图

Fig. 5 Diagram of defocusing detection results

为 204.45 nm ,此时由于离焦项系数为负,为焦内离焦 204.45 nm ,因此调节 PZT 向焦面方向即平面所在平台向下移动 204.45 nm ,此时得到的实验结果如图 6 所示,其中图 6(a)为由离焦及球差项表征的波面分布, $PV=0.0173\lambda$, $RMS=0.0054\lambda$;图 6(b)为离焦情况下与准焦时离焦项与球差项 Zernike

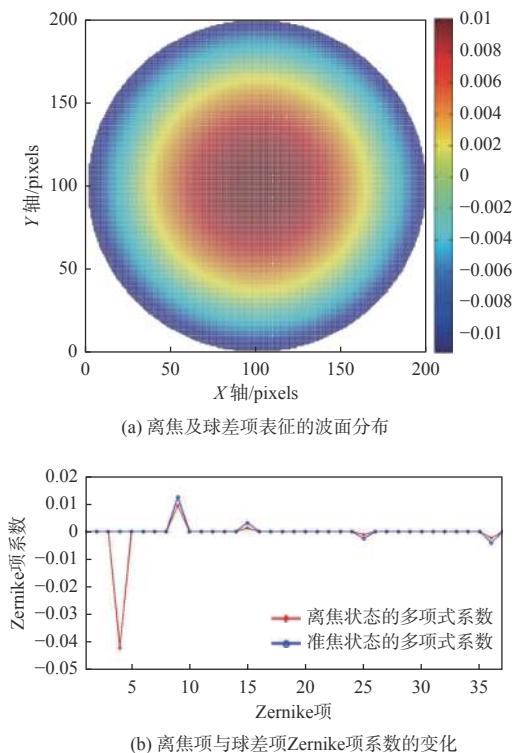


图 6 准焦时检测结果图

Fig. 6 Diagram of in-focus detection results

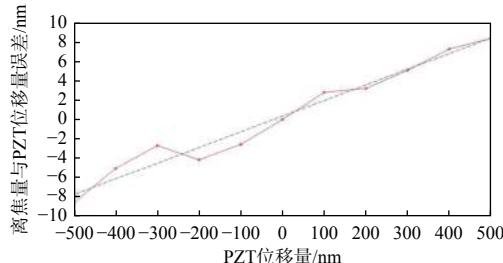


图 7 离焦量实验检测误差

Fig. 7 Experimental detection error of defocusing amount

项系数的变化, 离焦项系数已由 -0.042 1 变化为 0.000 2, 接近于零, 代入(6)式可得离焦量为焦内离焦 1.19 nm, 离焦基本已经消除。

为了进一步验证该检焦系统的正确性, 以上述实验得到的准焦位置为参考位置, 分别向焦内方向和焦外方向移动 PZT, 设置步长为 100 nm, 移动范围为 (-500 nm, 500 nm), 对比计算出的离焦量 S_1 与实际离焦量 S_2 即 PZT 位移量, 其最大误差小于 9 nm, 误差平均值为 4.55 nm, 误差均方根为 2.68 nm, 因此该系统的检焦精度达到 10 nm, 如图 7 所示。

在大数值孔径 NA 波像差的离焦解耦时, 来源于光学元件的误差会对光路产生球差影响; 对干

涉光路参考臂与测试臂的误差作了详细的测量和标定, 但是由于测量标定不能够严格地确认两臂之间的残余像差, 存在一定误差残留。除此以外, 对焦范围内检焦精度的误差主要来源于 PZT 调焦时的振动影响。另外由于本系统是基于显微干涉测量波像差, 因此还会存在干涉光路较长, 空气扰动带来的一定误差。

3 结论

本文提出了一种基于波像差判据的同步相移显微干涉检焦方法, 相比于已有的检焦方法, 提高了检焦系统的准确度与稳定性。本文建立了离焦量与波像差之间的关系模型, 提出了大数值孔径 NA 的显微物镜波像差中离焦量计算方法, 搭建了检焦实验装置, 仿真验证了该方法的正确性, 离焦探测灵敏度可达 4 nm; 实验验证了该方法可以准确地得到准焦面的位置, 检焦精度最优可以达到 10 nm, 表明了基于波像差判据的同步相移显微干涉系统的可行性。

参考文献:

- [1] LI Jinlong, HU Song, ZHAO Lixin. Control technique of wafer surface in dual-stage lithographic system[J]. Acta Optic Sinica, 2012, 32(12): 241-245. 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): 241-245.
- [2] YAO Hanming, HU Song, XING Tingwen. Optical projection exposure micro-nano processing technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006: 1-5. 姚汉民, 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.
- [3] SAKELLARI I. Direct laser writing of photonic nano-structures[J]. SPIE, 2009(1): 73920Y-1-9.
- [4] LI Fengyou, LU Zhenwu, XIE Yongjun, et al. Laser direct writing system with cartesian and polar coordinate[J]. Acta Photonica Sinica, 2002(5): 616-619.
- [5] ZENG Aijun, WANG Xiangzhao, XU Deyan. Progress in focus and level sensor for projection lithography system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004(7): 24-30. 曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2004(7): 24-30.
- [6] SHI Hongliang, SU HaiJun, NICHOLAS D, et al. Kin-

- ematic modeling and calibration of a flexure based hexapod nanopositioner[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(1): 117-128.
- [7] LIU Zhixiang, XING Tingwen, JIANG Yadong, et al. Measurement of wavefront aberration for high NA objective and some special problems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 482-490.
刘志祥, 邢廷文, 蒋亚东, 等. 大数值孔径物镜的波像差测量及其特殊问题[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 482-490.
- [8] YAN Liu, LI Yanqiu, CAO Zhen. Design method of off-axis extreme ultraviolet lithographic objective system with a direct tilt process[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 075102.
- [9] RHEE H U, KIM D I, LEE Y W. Realization and performance evaluation of high speed autofocusing for direct laser lithography[J]. *Journal of Physics: Conference Series Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(7): 073103-1-5.
- [10] HE Fengtao, BAI Yonglin, FENG Xiaoqiang, et al. Real-time measurement of micro-displacement and micro-vibration by astigmatism method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003(10): 1208-1211.
贺峰涛, 白永林, 冯晓强, 等. 像散法对微位移和微振动的实时测量[J]. 光子学报, 2003(10): 1208-1211.
- [11] TU Long, YU Jin, FAN Zhongwei, et al. Research on the technology of parallel laser confocal microscopy detection based on digital micromirror device[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 143-150.
涂龙, 余锦, 樊仲维, 等. 基于数字微镜的并行激光共焦显微检测技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 143-150.
- [12] HAO Xianpeng, REN Jianyue, ZHOU Zhenshu, et al. Design of focus error detection system based on critical angle method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 537-541.
郝贤鹏, 任建岳, 邹振书. 临界角法检焦系统的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 537-541.
- [13] KYOICHI S, HIROKI T, NOBUYUKI I, et al. Automatic laser-scanning focus detection method using printed focus pattern[J]. *SPIE*, 1995, 2440: 712-720.
- [14] WANG Chao. Researches on power control and design of miniaturized system for small defocus detection in laser writing equipment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
王超. 激光写入光功率控制及小型化离焦检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [15] LIANG Fengchao. Static characteristics of auto-focusing servo system based on critical angle method for laser writing[J]. *Electronics Optics& Control*, 2011, 18(5): 59-62.
梁凤超. 临界角法激光直写聚焦伺服系统静态特性研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(5): 59-62.