

光纤相移点衍射干涉仪关键技术

张宇¹,金春水²,马冬梅²,王丽萍²

(1. 东北电力大学理学院,吉林 长春 132012;

2. 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 130033)

摘要: 为了实现光学系统波像差的高精度检测,引入了改进的光纤相移点衍射干涉仪,介绍了其工作原理,并对干涉仪的关键部件包括激光光源及光纤的参数进行了选择和分析。经测试,激光光源功率稳定性约为1%(10 min),光斑尺寸在实现最佳耦合效率允许范围内,光束位置稳定度约为6 μm,相干长度为1 cm左右,都在测试精度允许范围内;选择了纤芯直径为3.5 μm的单模不保偏光纤,对光纤端面镀半反半透金属膜,实现了较高的条纹对比度和光能利用率,并设计了波前参考源,方便了光纤端面的抛光、镀膜及装卡。最后,利用选择的部件搭建了光纤相移点衍射干涉仪实验装置,为最终能够实现光学系统波像差的高精度检测提供了前期的准备。

关键词: 高精度检测; 光纤相移点衍射干涉仪; 光学系统波像差; 激光光源; 光纤

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0254-06

Key technology for fiber phase-shifting point diffraction interferometer

Zhang Yu¹, Jin Chunshui², Ma Dongmei², Wang Liping²

(1. College of Science, Northeast Dianli University, Changchun 132012, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to measure the wavefront aberration of optical system with the high accuracy, the improved fiber phase-shifting point diffraction interferometer was introduced, its working principle was introduced, and the parameters of the key components of the interferometer including laser source and fiber were selected and analyzed. After the test, the laser power stability was about 1%(10 min), the spot size was in the allowable range of the optimum coupling efficiency, the beam position stability was about 6 μm, the coherence length was about 1 cm, the above were all in the allowable range of testing accuracy; No polarization-maintaining single-mode fiber was selected, its core diameter was 3.5 μm, the fiber endface was coated transreflective metal film, the high fringe contrast and light energy utilization were realized, and the wavefront reference source was designed, it's convenient for the polishing, coating and clamping of fiber endface. Finally, the selected components were used to build experimental device of fiber phase-shifting point diffraction interferometer, above works provide preparation for ultimately achieving high accuracy test of the wavefront aberration of optical system.

收稿日期:2014-05-08; 修订日期:2014-06-03

基金项目:东北电力大学博士科研启动基金(BSJXM-201218)

作者简介:张宇(1985-),女,讲师,博士,主要从事光学检测方面的研究。Email:521zhangyu2008@163.com

Key words: high accuracy test; fiber phase-shifting point diffraction interferometer; wavefront aberration of optical system; laser source; fiber

0 引言

极紫外光刻(EUVL)技术作为下一代光刻技术的最佳候选技术,最大程度地继承了目前光学光刻的发展成果。作为光刻机核心单元之一的光刻物镜为了实现光刻分辨率及临界尺寸控制的要求,其RMS波像差应小于1 nm rms,要检测如此高精度的光学系统,就需要检测设备的检测精度达到亚纳米量级^[1]。

1972年 Raymond N.Smartt 和 J.Strong 发明了点衍射干涉仪。点衍射干涉仪利用小孔衍射产生的标准球面波作为干涉仪的参考球面波,能够实现高精度的检测^[2-5]。

光纤制造技术及耦合技术的发展为光纤取代点衍射干涉仪中的小孔提供了可能性^[6],目前光纤纤芯直径已经能够达到2 μm 以下,并且光纤可以进一步拉成光纤锥,使得纤芯直径进一步缩小,这样光纤就能够衍射出更高质量的标准球面波,从而就可以设计出更高精度以及结构更加合理的点衍射干涉仪。

光纤相移点衍射干涉仪在1996年由美国 Livermore

实验室首次提出,采用两根柔性光纤代替小孔构成了双光纤相移点衍射干涉仪^[7]。2005年 Canon 公司和 Livermore 公司联合报道的双光纤相移点衍射干涉仪,在1996年提出的方案基础上将光纤加上了偏振控制器,可以随意调整两束光的偏振态,提高条纹对比度。并且在光纤末端引入了波前参考源(WRS),该 WRS 大大地提高了衍射波的数值孔径,增加了被检光学系统的测量范围。目前该款干涉仪的检测精度为0.2 nm rms,重复精度为0.05 nm rms^[8-9]。

2005年 Canon 公司和 Livermore 公司联合报道的双光纤相移点衍射干涉仪虽然精度和重复精度很高,但是其结构还有需要改进的地方,并且作为高精度的干涉仪,其关键部件的选择及分析也是至关重要的,因此,还需要对其进行深入的研究。

文中对改进的光纤相移点衍射干涉仪的工作原理进行了介绍,对激光器的关键参数进行了详细的选择及分析,并对条纹对比度和光强利用率进行了分析,从而选择了合适的激光器和光纤,搭建了干涉仪,为实现高精度的光学检测提供了技术支持。

1 光纤相移点衍射干涉仪的基本原理

改进的光纤相移点衍射干涉仪的原理图如图 1

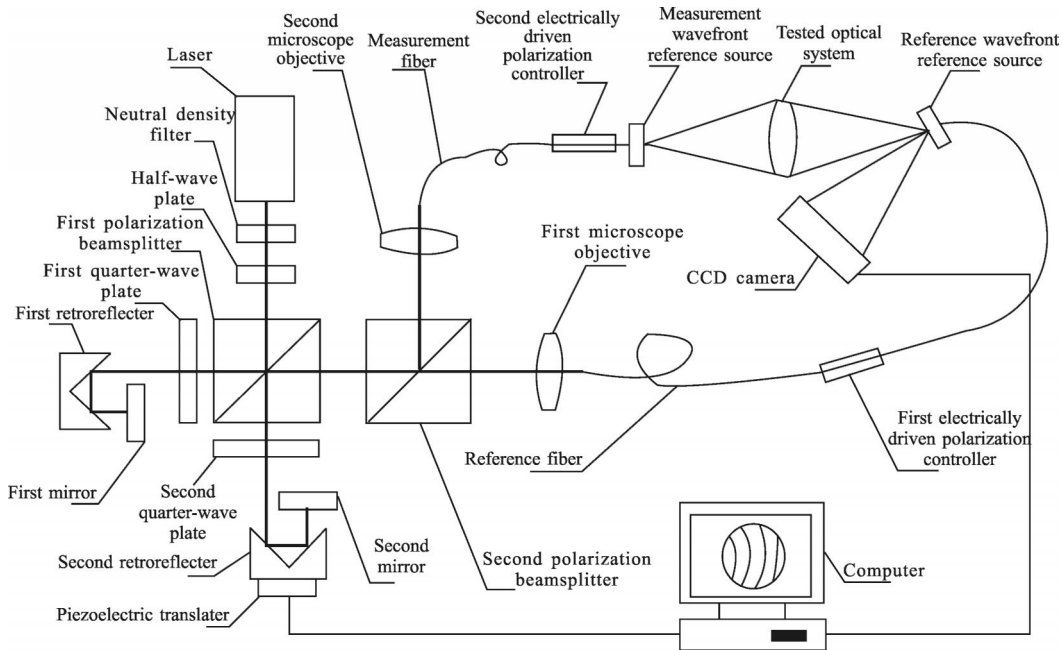


图 1 双光纤相移点衍射干涉仪原理图

Fig.1 Principle of the double-fiber phase-shifting point diffraction interferometer

所示,短相干激光器出射的光(波长为 532 nm)经中性密度滤光片衰减,然后经过 1/2 波片改变其线偏振光偏振方向,经分光系统出射的参考光和测试光分别经过第一耦合透镜和第二耦合透镜耦合到参考光纤和测试光纤中,测试 WRS 出射的光经被检光学系统照射到参考 WRS 的反射面上反射,调整第一角锥棱镜使测试波与参考波光程匹配从而产生干涉,利用 PZT 移动对偏摆误差敏感的角锥棱镜实现移相过程,并且加入第二平面反射镜使得对移相过程中的横移误差不敏感,利用光电探测器采集干涉图,送入计算机进行数据处理和分析,即得到 EUVL 物镜系统波像差^[10]。

2 关键部件选择及分析

由于光纤相移点衍射干涉仪要实现 EUVL 物镜系统波像差的高精度检测,因此对各个元器件及分系统的参数和结构都有严格的要求,包括激光光源、光纤、分光系统、相移系统、耦合系统、偏振控制系统及图像采集系统等,下面主要对激光光源、光纤的参数和结构进行选择和分析。

2.1 激光光源

对光源强度稳定性的分析得知,为了实现亚纳米量级的检测精度,要求激光器的光源强度稳定性达到 2% 以内。为了实现较高的耦合效率,要求光斑尺寸在 1 mm 以内。

为了保证激光器在实验过程中的正常使用,以及验证激光器的各个参数,对激光器的各项性能指标进行了检测,包括功率稳定性、光斑大小、形状、光强分布、光束位置稳定度以及相干长度。

激光参数测试分为在线探测与线下探测。

如图 2 所示,从激光系统出射的线偏振光通过可调中性密度滤光片调节光强,1:9 分光棱镜将激光分成两束,分出小部分激光在线实时探测激光功率变化,大部分激光由 1/2 波片调整偏振方向后入射到偏振分光棱镜。

在整个装置中设置了四个线下探测位,激光参数探测位 1 测量自由空间输出激光参数,探测位 2 测量耦合尾纤输出激光参数,探测位 3 测量激光经过某偏振分束系统后激光参数,探测位 4 测量经过偏振控制系统后激光参数。

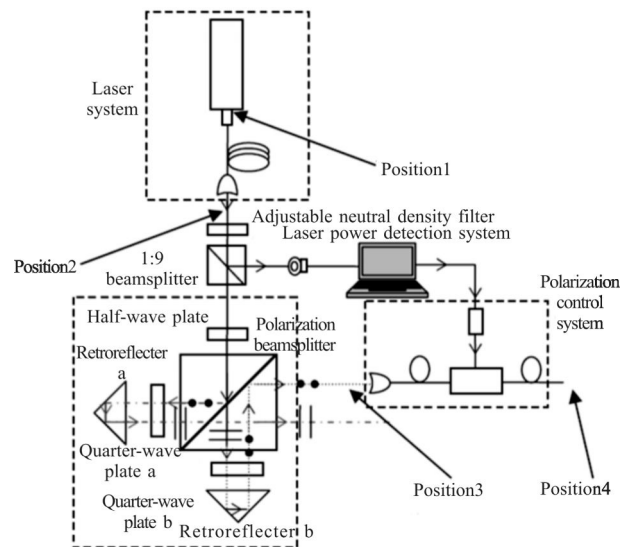


图 2 激光器技术参数测试位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser parameters in different testing positions

(1) 功率稳定性测试

激光器的功率稳定性将会影响到背景光强和调制度的变化,它将会直接影响到干涉仪的检测精度,因此需要对其进行严格的测量。

利用功率计对功率稳定性进行测试。测试结果如表 1 所示。

表 1 不同位置的激光功率稳定性

Tab.1 Laser power stability in different positions

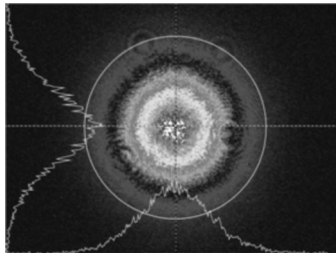
10 min	1 group	2 group
Position 2	1.53%	1.06%
Position 3(measurement light)	1.09%	0.99%
Position 3(reference light)	1.04%	0.87%
Position 4(measurement light)	1.13%	0.98%
Position 4(reference light)	1.08%	1.04%

在同等功率的情况下,无论是激光器尾纤输出,还是经过光学系统,或是经过偏振连续可控系统后激光参数,其功率稳定性几乎是一样的,此现象说明整个光学系统的机械振动及空气扰动不足以影响功率稳定性。在此次实验中,激光的功率稳定性约为 1%(10 min),符合激光器的性能参数指标,并且能够符合测试精度要求。

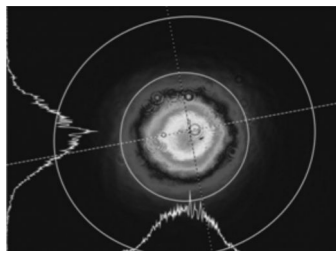
(2) 光斑大小、形状及光强分布测试

利用光束质量分析仪分别测试四个探测位得

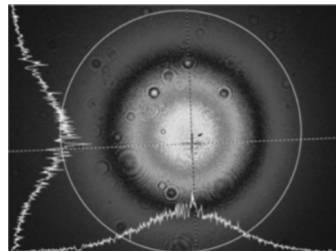
知,如图 3 所示,激光器尾纤出射光斑直径小于 1 mm,激光器尾纤出射光束质量较好,经过偏振分束系统后光束质量明显变差,主要是由各个光学元件的面形导致,而经过光纤衍射后,光束质量变好,原因是光纤衍射会对光束进行滤波,提高光束质量。经过偏振分束系统后的激光光斑直径约为 1.3 mm,在实现最佳耦合效率的光斑允许范围内(耦合透镜的最佳耦合效率范围为 1.1~1.6 mm)。



(a) 激光器尾纤输出端口(位置 2)光斑大小、形状、光强分布
(a) Spot size, shape and intensity distribution in the output port of laser pigtail(position 2)



(b) 激光光束经过偏振分束系统后(位置 3)光斑大小、形状、光强分布
(b) Spot size, shape and intensity distribution after the laser beam passing through the polarization beam splitting system(position 3)



(c) 激光光束经过偏振控制系统后(位置 4)光斑大小、形状、光强分布
(c) Spot size, shape and intensity distribution after the laser beam passing through the polarization control system(position 4)

图 3 光斑大小、形状及光强分布图

Fig.3 Map of spot size, shape and intensity distribution

(3) 如果光束位置稳定度不佳将引起不同时刻耦合效率的不同

如果光束位置稳定度不佳将引起不同时刻耦合效率的不同,也就间接引起光强不稳定误差,并且会引起光程差的变化,从而引起干涉图像的抖动,因此需要对光束位置稳定度进行测量,并且不同位置的光束位置稳定度不同能够说明实验装置中是否有较大振动存在。光束位置稳定度包含指向稳定度和平移稳定度两项,采用光束质量分析仪测量结果如表 2 所示。

表 2 不同位置的光束位置稳定度

Tab.2 Beam position stability in different positions

	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$\Delta s/\mu\text{m}$
1 m away from the laser pigtail	5.7	6.2	5.95
Reference light	1.8	8.89	6.41
Measurement light	3.96	8.72	6.77

根据结果分析,光束位置稳定度不会引起耦合效率的变化,并且经过偏振分束系统前和经过偏振分束系统后差异不大,说明实验装置中没有较大振动存在。

(4) 相干长度

对于文中的实验装置,实际上到达 CCD 上的光有三束,分别是测试光、参考光以及参考-测试光(参考光的一部分光照射到被检光学系统后聚焦到测试光纤端面后反射,再次经过被检系统、测试光纤端面反射形成参考-测试光)。如果采用长相干激光器,那么这三束光两两组合,除了测试光和参考光形成的干涉图外,CCD 还会采集到其他的干涉图样,虽然参考-测试光的光强较弱,但是依然会对测试结果进行干扰。因此实验选择了短相干长度的激光器($\lambda=532\text{ nm}$)。

下面将对激光器的相干长度进行测试。首先,移动参考光路中的角锥棱镜找到干涉条纹对比度最好的等光程位置,然后以此作为基准点,调整角锥棱镜向一个方向移动,直至完全不能分辨干涉条纹,如图 4(c)~(a)所示,记录下当下的位置,再反方向移动,干涉条纹逐渐清晰,达到干涉条纹对比度最好点,然后逐渐模糊,直到不能分辨,如图 4(a)~(e),记录其位置,两个不能分辨条纹的位置之间的距离就是相干长度。经过反复的测量,激光器的相干长度为 1 cm 左右,符合短相干条件。

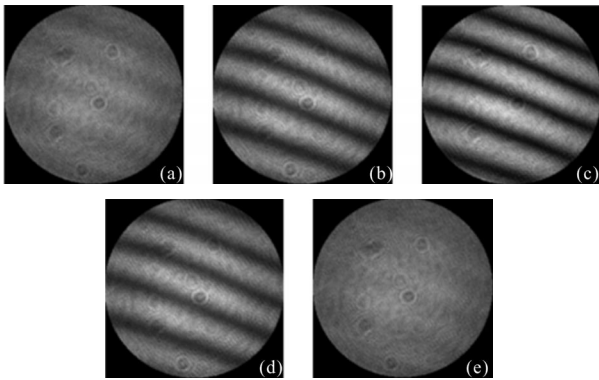


图 4 条纹对比度随光程差的变化

Fig.4 Change of fringe contrast with the change of the optical path difference

2.2 光 纤

光纤相移点衍射干涉仪的标准球面波是由光纤产生的,因此光纤本身的参数直接影响着其产生的标准球面波的质量,因此对光纤的选择以及加工就显着至关重要。

为了得到较高质量的标准球面波,选择的光纤参数如下:单模不保偏光纤,光纤的模场直径为 $3.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$,二阶模式截止波长为 $430 \pm 20 \text{ nm}$ 。

为了达到较高的条纹对比度和实现较高的光强利用率,需要对光纤端面进行镀膜。下面就对两束相干光的光强进行分析,并最终确定光纤端面的处理方案。

到达 CCD 上的测试光和参考光要经过多个光学元件,这些光学元件的反射率或是透过率直接影响着两束光的光强比。可以通过调整 $1/2$ 波片来调节两束光的光强比,下面对光纤端面不镀膜和镀膜两种情况进行讨论。

首先讨论光纤端面不镀膜的情况。光路中每个元件的透过率或反射率如下。

(1) $1/2$ 波片:透过率 97.5%,假设其对参考光和测试光的分光比为 $m:n, m+n=1$; (2) 偏振分光棱镜: P 光透过率 95%, S 光反射率 99%; (3) $1/4$ 波片:透过率 97.5%; (4) 角锥棱镜:透过率:99.5%; (5) 反射镜:反射率 99.5% (0° 入射); (6) 耦合透镜:耦合效率 60%; (7) 光纤传输损耗:采用 2 m 的光纤,其透过率为 98.5%; (8) 被检光学系统:透过率 88%; (9) 光纤端面:4% (不镀膜)。

假设激光光强为 I ,那么到达 CCD 的参考光强为:

$$I_1 = I \times 97.5\% \times m \times 50\% \times 99\% \times 97.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 97.5\% \times 95\% \times 95\% \times 60\% \times 98.5\% = 0.241 \text{ mI}$$

到达 CCD 的测试光强为:

$$I_2 = I \times 97.5\% \times n \times 50\% \times 95\% \times 97.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 97.5\% \times 99\% \times 99\% \times 60\% \times 98.5\% \times 88\% \times 4\% = 0.0088 \text{ nI}$$

为了达到最大的条纹对比度,需使两束光强匹配,即 $I_1 = I_2$,那么可以得到:

$$m = 0.0352 \quad n = 0.9648 \quad I_1 = I_2 = 0.0088 I$$

可以看出,在参考光纤端面不镀膜的情况下,为了使得参考光和测试光光强匹配, $1/2$ 波片的分光比约为 1:27,造成两束光在光纤出射端面出射的光强相差太大,其光能利用率极低,有很大一部分光在光纤端面损失了。而造成光强利用率低的主要原因在于参考光纤端面的反射率太低,只有 4%,在光纤端面镀反射膜可以增加反射率,但是这样会减小光纤的透过率,因此考虑镀半反半透膜。

在光纤端面镀膜后,参考光的光强为:

$$I_1 = I \times 97.5\% \times m \times 50\% \times 99\% \times 97.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 97.5\% \times 95\% \times 95\% \times 60\% \times 98.5\% \times 50\% = 0.1205 \text{ mI}$$

测试光的光强为:

$$I_2 = I \times 97.5\% \times n \times 50\% \times 95\% \times 97.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 99.5\% \times 97.5\% \times 99\% \times 99\% \times 60\% \times 98.5\% \times 88\% \times 50\% = 0.11 \text{ nI}$$

此时,为了使两束光强匹配,可以得到:

$$m = 0.4772 \quad n = 0.5228 \quad I_1 = I_2 = 0.0575 I$$

此时, $1/2$ 波片的分光比接近 1:1,光能的利用率也提高了近 7 倍。

光纤端面的处理是此实验的重点技术,除了需要保证干涉条纹对比度外,还需要保证光纤端面出射球面波的质量及光纤端面反射波的质量,因此该实验对光纤端面先进行抛光,然后镀半反半透金属膜。

由于单模光纤较脆弱,并且端面面积较小,因此直接对单模光纤端面抛光及镀膜极为困难,并且在实验中单模光纤的装卡也较困难。为了解决上述困难,将光纤出射端埋入一个一英寸的石英试片中,这样对整个石英试片进行处理,降低了处理难度。首先对石英表面进行抛光,抛光后利用高倍显微镜进行观察,确保光纤端面处清洁,没有划痕、裂痕,实际上,要把光纤端面抛光到几百分之一波长很困难,但是最终测试光经被检光学系统聚焦到参考光纤端面上的聚焦光斑仅为几个微米,衡量这么小面积上的面形精度,要远远高于整个光纤端面上的面形精

度。在抛光之后,利用实验室的镀膜机,对整个石英片镀金属膜,即完成了对光纤端面的处理,也就形成了波前参考源(WRS),如图5所示。

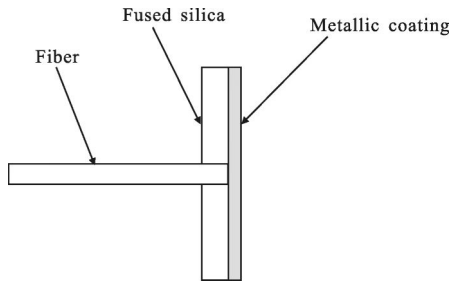


图5 波前参考源结构图

Fig.5 Structure diagram of wavefront reference source

3 实验搭建

根据实验方案及选择的元件,购买了相关的实验器件,在实验室的气浮平台上搭建了光纤相移点衍射干涉仪原理实验装置开展了相应的实验,为实现高精度的检测打下了基础。

图6为光纤相移点衍射干涉仪的实验装置图,主要组成部分包括:短相干激光器、衰减片、1/2波片、偏振分光棱镜(PBS)、1/4波片、角锥棱镜、平面反射镜、耦合透镜、单模光纤、偏振控制器、CCD及与之相对应的机械调整机构等。

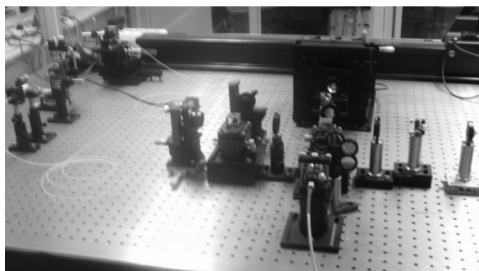


图6 光纤相移点衍射干涉仪的实验装置图

Fig.6 Experimental layout of fiber phase-shifting point diffraction interferometer

4 结论

介绍了改进的光纤相移点衍射干涉仪的工作原理,对干涉仪的关键部件包括激光光源及光纤的参数进行了选择及分析。经测试,选择的激光光源的功率稳定性约为1%(10 min),符合测试精度要求;激光器尾纤出射光斑大小小于1 mm,经过偏振分束系统后的激光光斑尺寸约为1.3 mm,在实现最佳耦合效

率的光斑允许范围内;光束位置稳定度约为6 μm ,并不会引起耦合效率的变化;激光器的相干长度为1 cm左右,满足短相干条件。选择了纤芯直径为3.5 μm 的单模不保偏光纤,经计算,为了实现较高的条纹对比度和光能利用率,对光纤端面镀半反半透金属膜,并且为了方便光纤端面的抛光、镀膜及装卡,将光纤出射端埋入一个一英寸的石英试片中进行处理,降低了处理难度。最后搭建了光纤相移点衍射干涉仪,为高精度的光学系统波像差检测提供了必要条件。

参考文献:

- [1] He Yong, Chen Lei, Wang Qing, et al. Twyman-Green infrared phase-shifting interferometer and application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 335-338. (in Chinese)
- [2] Otaki, Yamamoto T, Fukuda Y, et al. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2002, 20(1): 295-300.
- [3] Otaki K, Ota K, Nishiyama I, et al. Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: Design, fabrication, and evaluation [J]. *J Vac Sci Technol B*, 2002, 20(6): 2449-2457.
- [4] Kazuya Ota, Tokahiro Yamamoto, Yusuke Fukuda, et al. Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors[C]//SPIE, 2001, 4343: 543-550.
- [5] Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Zhang Lichao et al. Wave-Front quality analysis of three-dimension pinhole vector diffractive in extreme ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2849-2854. (in Chinese)
- [6] Nie Liang, Han Jun, Yu Xun, et al. Phase shifting interferograms processing for fiber point-diffraction interferometer[C]//SPIE, 2008, 7155: 71551G.
- [7] Sommargren Gary E, Phillion Donald W, Johnson Michael A, et al. 100-picometer interferometry for EUVL[C]//SPIE, 2002, 4688: 316-328.
- [8] Seiji Takeuchi, Osamu Kakuchi, Kenji Yamazoe, et al. Visible light point-diffraction interferometer for testing of EUVL optics[C]//SPIE, 2006, 6151: 61510E.
- [9] Johnson Michael A, Phillion Donald W, Sommargren Gary E, et al. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems [C]//SPIE, 2005, 5869: 58690P.
- [10] Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, et al. Measuring technology for wavefront aberration of EUVL objective system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3384-3389. (in Chinese)