

# 温度对 Fizeau 干涉仪测量重复性的影响

苗二龙 谷勇强

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 高精度的重复性是保证检测精度的前提,也是精密检测中最重要的指标之一。在 Fizeau 干涉仪中,干涉腔对环境特别是温度的变化非常敏感,温度的变化和非均匀性是测量的主要误差来源,也是影响测量重复性的主要因素之一。通过研究光在空气中的传播原理,利用 Edlen 公式建立了 Fizeau 干涉仪干涉腔的理论模型,并给出了腔长、温度变化大小与干涉仪重复精度的定量关系。理论分析表明,干涉仪重复精度主要跟温度变化大小和干涉仪腔长有关。利用 ZYGO 公司的干涉仪,通过实验给出了在不同环境中、不同腔长下干涉仪测量重复精度的变化,并与理论计算进行了比较和分析。

**关键词** 测量;Fizeau 干涉仪;干涉腔;Edlen 公式;重复精度

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1212008

## Temperature Influence on Fizeau Interferometer Repeatability

Miao Erlong Gu Yongqiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** High precision repeatability is the precondition of testing accuracy and also one of the most important parameters of high precision testing. In Fizeau interferometer, the interferometer cavity is sensitive to environments, especially to temperature variation. Temperature is also one of the main factors that influence the test repeatability. The interferometer cavity model is established based on Edlen equations according to light transmission theory. The theoretical analysis shows that the repeatability is mainly affected by the cavity length and the temperature variation. The repeatability variation is tested through ZYGO interferometer at different environments and different cavity lengths. The test and computation results are compared and analyzed.

**Key words** measurement; Fizeau interferometer; interferometer cavity; Edlen equation; repeatability

**OCIS codes** 120.3180; 120.3940; 120.5050; 220.4840

## 1 引 言

在光学精密制造领域,光学元件的精度是光学制造水平的标志之一,它直接决定了光学系统的性能。随着技术的发展,光学系统越来越复杂,光学系统的元件数量越来越多,对元件制造的精度要求也越来越高。一些大型天文望远镜和光刻机投影物镜镜头,其面形精度达到纳米甚至亚纳米的精度,是目前精度要求最高的光学系统之一<sup>[1]</sup>。目前国内已经开展了深紫外(DUV)193 nm 和极紫外(EUV)13 nm光刻投影物镜的研制,其中 193 nm 光刻物镜

镜头系统元件达 20 多片,系统波像差要求在 10 nm 以内。这些高精密光学系统要求元件面形精度达到纳米至亚纳米的精度,对光学元件的制造提出了极高的要求<sup>[2]</sup>,基本上接近目前光学加工检测水平的极限。

检测是精密制造的基础,贯穿整个精密制造过程,检测的精度往往决定了最终元件的加工水平和系统能达到的精度。现代光学精密制造技术日新月异,新的加工手段层出不穷。磁流变(MRF)和粒子束(IBF)加工技术可以对光学元件进行亚纳米量级

**收稿日期:** 2011-07-12; **收到修改稿日期:** 2011-09-08

**基金项目:** 国家科技重大专项(2009ZX02205)资助课题。

**作者简介:** 苗二龙(1976—),男,博士,副研究员,主要从事光学设计和光学精密检测等方面的研究。

E-mail: miaoxx@gmail.com

的去除。限制最终加工精度的主要因素是检测技术的发展,如果检测精度达不到亚纳米量级,依然无法制造出纳米至亚纳米精度的光学元件。而亚纳米的精密检测技术受到各种因素的影响,对检测仪器本身以及检测环境都有严格的要求。研究纳米至亚纳米精度的高精检测技术对于光学精密制造具有重要意义。传统的光学元件面形一般采用干涉仪进行检测,精度一般在  $\lambda/20$  (峰谷值, PV), 远远不能满足现代光学精密制造的要求。针对这一矛盾,各国的研究机构开展了精密检测技术的研究<sup>[3]</sup>,分析影响干涉仪检测精度的因素<sup>[4~6]</sup>,提出了新的干涉检测方法<sup>[7,8]</sup>。特别是各大光刻机厂商,都研制了专用的超高精度检测设备,以满足光刻机元件的检测需求。目前能用于光刻机元件面形检测,精度达到纳米至亚纳米的检测设备主要是 Fizeau 干涉仪和点衍射干涉仪。衡量这些检测仪器和检测结果的一个重要指标是重复性。高精度的重复性是保证检测精度的前提,也是精密检测中最重要的指标之一。在一定的重复精度下,通过校准可以大大提高检测精度。本文主要研究了环境温度变化对干涉仪重复性的影响,利用 Edlen 公式<sup>[9,10]</sup>给出了在温度的微小变化下,空气折射率的变化情况及其对光程的影响,并利用 Fizeau 干涉仪在不同环境中针对不同的干涉腔长进行了实验验证,分析了理论结果和实验结果的差别,给出了不同干涉腔长下高精检测对温度稳定性和温度均匀性的要求。这对高精检测特别是高精检测环境的建设具有重要参考意义。

## 2 温度变化对干涉腔的影响

影响干涉仪检测精度的因素很多,可以分为系统误差和随机误差两大类。系统误差一般可以通过绝对检测、标准面等校准方法进行去除。提高检测精度的关键是消除随机误差的影响。目前干涉仪硬件如 CCD、激光器和压电陶瓷(PZT)等已经做得足够好,对随机误差贡献较小。环境是影响重复性最主要的因素。Fizeau 干涉仪利用共光路的特点,大大降低了仪器本身带来的误差干扰和部分环境影响。通过绝对检测对参考面和干涉仪进行绝对标定<sup>[11~13]</sup>,消除参考面引入的误差,使得检测精度大大提高。

无论 Fizeau 干涉仪或点衍射干涉仪<sup>[14]</sup>都不可避免地受到检测环境的影响,包括振动、温度和压强等,特别是温度的变化,使得空气的折射率发生变化,从而引起光程发生变化,直接在检测结果中导入

了误差<sup>[15]</sup>。下面从 Edlen 公式出发,以 Fizeau 干涉仪为例,给出温度变化对干涉仪重复性的影响。Fizeau 干涉仪的基本原理如图 1 所示。

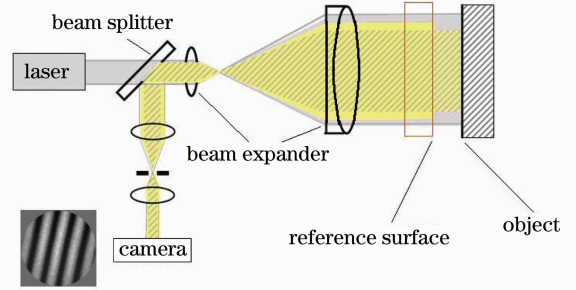


图 1 Fizeau 干涉仪原理示意图

Fig. 1 Diagram of the Fizeau interferometer

从 Fizeau 干涉仪的原理图可以看出,由于采用了共光路设计,参考面之后的光路受到温度的影响同时作用于参考光和被测光,因此不影响最终测量结果。受温度影响最大的是参考面和被测面之间的干涉腔。如果干涉腔中的温度发生变化,就会改变空气折射率,因此改变了被测光的光程,导致干涉条纹发生变化。空气折射率的变化主要受到温度、大气压强和湿度变化的影响。根据 Edlen 公式<sup>[9,10]</sup>,空气折射率是温度和压强的函数,可表示为

$$(n-1)_{t,p} = \frac{p(n-1)_s}{96095.43} \times \frac{1 + 10^{-8}(0.613 - 0.00998t)p}{(1 + 0.0036610t)}, \quad (1)$$

式中  $p, t$  分别是空气压强和温度,  $(n-1)_s$  为标准空气折射率,表示在一个大气压、温度为  $20^\circ\text{C}$  时的标准空气折射率,其中标准空气指各气体体积分数为氮气 78.09%, 氧气 20.95%, 氩气 0.93%, 二氧化碳 0.03%。根据 Edlen 公式,温度为  $15^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$  时,空气折射率可以写成

$$(n-1)_{t,p} = \frac{2.8793p}{1 + 0.003671t} 10^{-9}. \quad (2)$$

从(2)式出发,可以得到空气折射率随温度和压强的变化关系

$$\Delta n = \frac{p\Delta t}{(1 + 0.003671t)^2} 10^{-11}, \quad (3)$$

$$\Delta n = \frac{2.8793\Delta p}{1 + 0.003671t} 10^{-9}. \quad (4)$$

如果取大气压为一个标准大气压( $p=1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ),温度为  $20^\circ\text{C}$ ,由(3),(4)式可以看出温度对空气折射率的影响比气压的影响大 2~3 个数量级,因此这里仅考虑温度的影响。根据 Fizeau 干涉仪

相移测量原理,由参考光和被测光之间的光程差引入的相位可以表示为

$$\varphi = 2Ln \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (5)$$

式中  $L$  是干涉腔的长度,  $n$  为空气折射率。假定干涉腔长和波长保持不变,如果空气折射率发生变化,引起的相位变化为

$$\Delta\varphi = 2L\Delta n \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,干涉腔腔长越长,折射率变化引起的相位变化越大。因此,在高精度检测中需要尽量缩短干涉腔长,避免外界干扰。根据(6)式,可以计算出不同干涉腔长下,温度整体变化引入的测量误差,如图 2 所示。

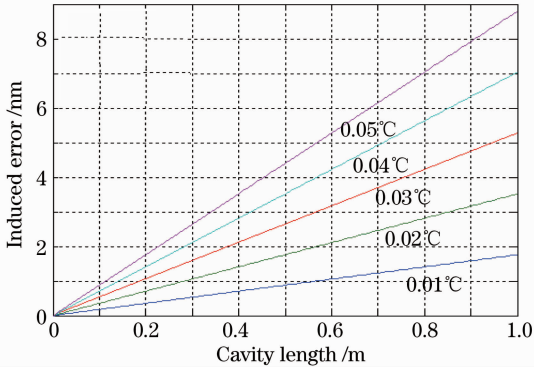


图 2 温度变化引入的测量误差

Fig. 2 Temperature variation induced error

由图 2 可以看出,测量误差随着腔长和温度变化量增加而增加。对于 1 m 的腔长,温度变化 0.05 °C 引入的误差为 9 nm 左右,不能满足 193 nm 光刻等一些高精度元件的检测要求。为了达到亚纳米的检测精度,需要控制腔长小于 0.5 m,温度变化小于 0.01 °C。为了得到高精度的真实面形,除了温度的稳定性要求,还需要严格控制温度梯度分布,使得干涉腔中达到良好的均匀性。为简单起见,这里仅考虑平面干涉腔,如图 3~5 所示。

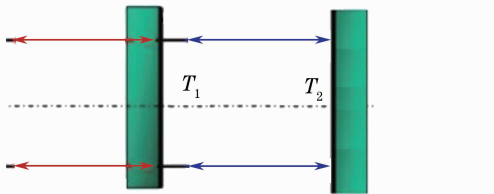


图 3 温度轴向分布

Fig. 3 Temperature axial distribution

温度在干涉腔中的梯度分布可以分为 3 种情况进行考虑。一种是沿着轴向分布,如图 3 所示。假定此时径向分布均匀,则干涉腔引入一个整体光程

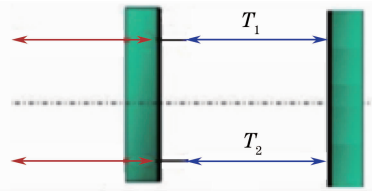


图 4 温度纵向分布

Fig. 4 Temperature vertical distribution

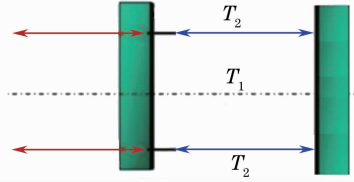


图 5 温度径向分布

Fig. 5 Temperature radial distribution

差(piston),对最终的检测结果没有影响。另外一种是纵向分布,如图 4 所示,此时相当于在最终结果中引入了一个倾斜(tilt),也可以通过拟合去除其对面形的影响。图 5 是温度沿着径向分布,镜片中心温度和边缘分布不一致,导致面形测量误差,这种误差无法去除。根据(6)式,可以计算出温度梯度的影响,如图 6 所示。

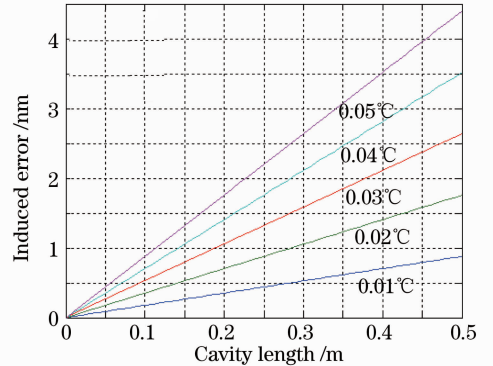


图 6 温度径向梯度引入的测量误差

Fig. 6 Temperature radial gradients induced error

由图 6 可以看出,温度梯度的影响和温度整体变化的影响在同一量级,控制腔长和温度的梯度对于精密测量非常重要。样品中心和边缘的温度梯度需要控制在 0.01 °C 以下才能保证在 0.5 m 的干涉腔长时引入的误差小于 1 nm。

### 3 不同干涉腔长下重复精度测试

为了对以上的计算结果进行验证,检测温度对实际系统的影响,利用干涉仪和标准平板组成不同的腔长在不同的环境温度下进行了重复性实验。干涉仪采用 ZYGO 公司生产的 VeriFire Asphere

(VFA)干涉仪。VFA 是一个立式系统,本身带有 MetroCell 隔振保温系统,能够隔绝外界振动和温度变化的影响。另外可以进行样品台远程操控和自动零条纹调节,因此最大限度地避免了人为操作的影响。为了检测温度的影响,采用了 Fluke 公司生产的温度传感器对干涉腔温度变化进行监控。在实验中,腔长分别设为 1,10,20,30,40 cm,并对温度和振动进行监控。图 7 为实测干涉仪地面振动情况。

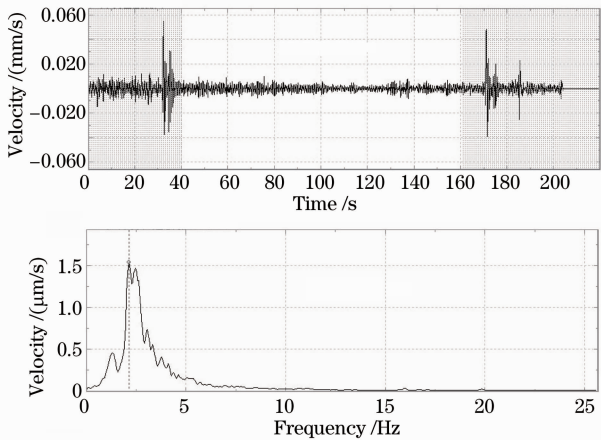


图 7 实验室振动情况

Fig. 7 Vibration of the laboratory

振动达到微电子厂房设计振动标准 F 级(VC-F)的标准,因此振动对干涉仪的影响可以忽略不计。图 8 是在不同腔长时,腔内温度的变化情况。

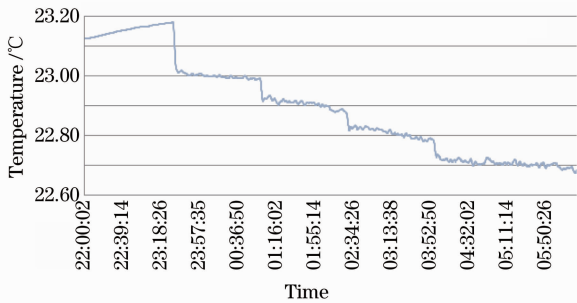


图 8 腔长变化时干涉腔温度实时变化  
(干涉腔每个移动 10 cm)

Fig. 8 Cavity temperature variation with time when the cavity is changing (the cavity changes 10 cm every time)

由于激光器发热,干涉腔上部温度高于腔底部,上下存在温度梯度。随着样品台的降低,干涉腔变长,样品台所处的温度也不相同,如图 8 所示,温度拐点处为腔长发生变化之后的实时温度值,其中横轴是时间轴。每移动 10 cm,温度下降约 0.1 °C,而且在腔长较长时,温度波动增大。在以上的温度和振动情况下,用 2 个 ZYGO 公司的标准平板组成不

同长度的干涉腔,分别进行 50 次测量,其中相位平均次数分别为 8,16 和 32 次。为了得到测量结果的重复性,先针对 50 次测量结果的均方根(RMS)值做平均,求得每次测量结果与平均值的差值后再求平均,得到测量结果偏差的平均值,偏差的平均值反映了测量的重复性,结果如图 9 所示。

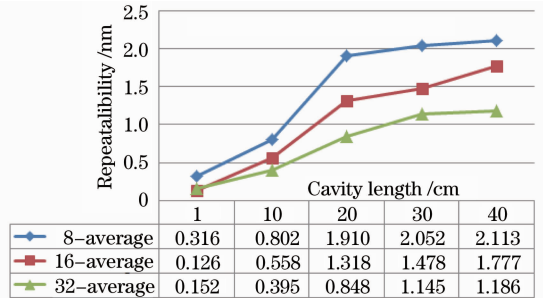


图 9 不同腔长测量结果偏差

Fig. 9 Repeatability at different cavity lengths

可以看到随着腔长增加测量结果偏差增大,这表明由于温度梯度的存在和温度变化的影响,干涉腔折射率发生变化,从而使得测量结果波动增大。在腔长为 1 cm 时,温度影响较小,偏差主要是干涉仪本身的噪声影响,量级在 0.5 nm 以下。随着距离增大,干涉腔变长,温度影响逐渐成为主导,温度的梯度和由此带来的气流扰动使得偏差增大。在腔长继续增加时,由于空气扰动的随机性,平均效应增大,虽然偏差仍随腔长增加而增加,但变化趋于平缓。另外相位平均次数可以去除测量过程中的随机误差,减小气流扰动带来的影响,随着相位平均次数增加,测量偏差明显减少。

在精密检测中,通常会采用封闭的环境,可以将外界干扰隔离,特别是干涉腔可以采用封闭罩的方式减小外界温度和气流的扰动。但是此时要求封闭罩内没有热源,否则热源在封闭环境中会造成温度梯度和气流扰动,反而使得检测结果误差增大。干涉仪中的激光器和 CCD 是两大热源,特别是在封闭的腔中,如果没有经过特殊处理,会造成干涉腔中存在温度梯度,影响最终测量结果。针对这种情况,也进行了实验研究。

对精密温控实验室环境进行了 48 h 监控,结果如图 10 所示。可以看到在短时间内,温度变化优于 ±0.02 °C,保证了干涉仪受温度变化影响较小。在此环境中进行了干涉仪精密检测,对不同腔长的干涉腔进行了重复性测试,结果如图 11 所示。

图 11 中方块所在曲线为精密环控实验室中利用 ZYGO 的 XPD 干涉仪进行测试的结果。腔长分

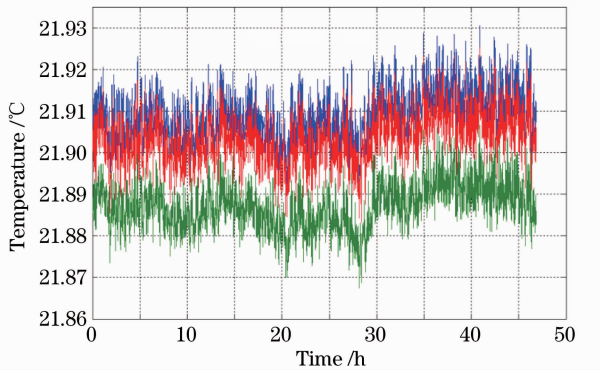


图 10 精密温控

Fig. 10 Precise temperature control

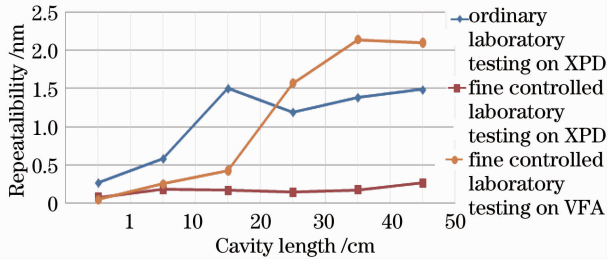


图 11 腔重复性测试

Fig. 11 Cavity repeatability testing

别为 1~50 cm, 周围温度控制在  $\pm 0.02$  °C 以内, 开放环境, 没有热源影响, 腔内温度变化和温度梯度都非常小。随着腔长增加, 干涉仪重复性略有增加。实心圆所在曲线为立式干涉仪 VFA 中测试结果, 可以看到随着腔长增加, 干涉仪重复性急剧变差, 随后变化趋势变缓。由于 VFA 是一个封闭的环境, 因此可以隔绝外界环境气流和温度变化影响。但是由于内部的激光器和 CCD 发热, 因此干涉腔内上部和下部存在温度梯度。开始由于腔长较短, 因此测量结果与精密环控实验室测量结果相近。随着腔长增加, 温度变化和梯度影响急剧增大。而在腔长进一步增加时, 由于温度造成的气流扰动随机性, 存在平均效果, 因此变化趋势变缓。三角所在曲线为普通光学检测实验室面形重复性测试曲线, 其测量结果受温度影响较精密环控实验室和 VFA 大, 然而在腔长较长时, 其测试结果优于 VFA。这主要是由于 VFA 为封闭环境, 激光器和 CCD 散发的热量无法及时排除, 因此造成内部温度梯度和气流扰动存在, 特别是在长腔长的时候, 其测试结果不如开放环境中的测试结果。

## 4 结 论

主要研究了温度对干涉仪重复精度的影响, 分

析了温度对空气折射率的影响, 给出了温度变化和温度梯度对干涉腔光程的影响。通过干涉仪重复性的测试, 在实验上验证了温度对实际检测结果的影响。结果表明, 要达到亚纳米的检测精度, 对环境温度的稳定性和均匀性都有非常严格的要求。实验结果不仅对高精密检测环境的建设具有重要参考价值, 对干涉仪和光刻物镜元件的设计也具有一定的指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 T. Matsuyama, Y. Ohmura, D. M. Williamson. The lithographic lens: its history and evolution [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 615403
- 2 G. E. Sonnmargren, D. W. Phillion, M. A. Johnson *et al.*. 100-picometer interferometer for EUVL [C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 316~328
- 3 D. Bernd, S. Günther. Interferometric testing of optical surfaces of its current limit [J]. *Int. J. Light & Electron. Opt.*, 2001, **112**(9): 392~398
- 4 Oliver P. Lay. Systematic errors in nulling interferometers [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(33): 6100~6123
- 5 J. Schwider, R. Burow, K. E. Ellsner *et al.*. Digital wavefront measuring interferometry: some systematic error sources [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- 6 Vincenzo Greco, Giuseppe Molesini. Micro-temperature effects on absolute flatness test plates [J]. *Pure & Appl. Opt.*, 1998, **7**(6): 1341~1346
- 7 J. E. Millerd, N. J. Brock, J. B. Hayes *et al.*. Instantaneous phase-shift, point-diffraction interferometer [C]. *SPIE*, 2004, **5531**: 264~272
- 8 R. Wilhelm, B. Luong, A. Courteville *et al.*. Dual-wavelength low-coherence instantaneous phase-shifting interferometer to measure the shape of a segmented mirror with subnanometer precision [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(29): 5473~5491
- 9 B. Edlen. The refractive index of air [J]. *Metrologia*, 1966, **2**(2): 71~80
- 10 K. P. Brich, M. J. Downs. Correction to the updated Edlen equation for the refractive index of air [J]. *Metrologia*, 1994, **31**(4): 315~316
- 11 P. Hariharan. Interferometric testing of optical surfaces: absolute measurement of flatness [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(9): 2478~2481
- 12 F. Bozenko, I. David, J. Christopher *et al.*. Calibration of a 300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(28): 5161~5171
- 13 D. Malacara. Phase Shifting Interferometry, in Optical Shop Testing [M]. New York: Wiley, 2007. 547~655
- 14 Ma Qiang, Liu Weiqi, Li Xiangbo *et al.*. Analysis of diffraction wavefront error in point diffraction interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2321~2324
- 15 Miao Erlong, Gu Yongqiang, Zhang Jian *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029~2034

苗二龙, 谷永强, 张 健等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(8): 2029~2034

栏目编辑: 何卓铭