

一种新型差分平面镜干涉仪

钟朝阳 句爱松 乐燕芬 侯文玫

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要 针对传统差分平面镜干涉仪结构复杂、需要光学部件多而导致系统调试困难、测量信噪比低等缺点,提出了一种结构简单需要光学部件少的新型差分平面镜干涉仪系统。此干涉仪能够产生对称的空间四光路,对环境因素(湿度、温度及大气压)的变化有很好的抗干扰能力,测量分辨率高。如果附加其他光学元件,可轻易实现对偏摆角、微滚转角、直线度等几何量的测量。静态状态下,其位移漂移小于1 nm,而同等条件下传统迈克耳孙干涉仪漂移大于10 nm。基于此系统的精密角度测量干涉仪,使用电子细分为 $2\pi/516$ 的相位计,可以得到 $0.024 \mu\text{rad}$ 的测量分辨率。

关键词 测量;外差干涉仪;差分平面镜干涉仪;光程死区

中图分类号 TN741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1112007

A Novel Differential Plane Mirror Interferometer

Zhong Chaoyang Ju Aisong Le Yanfen Hou Wenmei

(College of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract Because the tradition differential plane mirror interferometer (DPMI) has the disadvantages of complicated structure, many optical components and difficulty for adjusting, a novel differential plane mirror interferometer is proposed. Due to its diagonal symmetry of the two frequencies beams, this system has a good stability with environmental variation and a high resolution. With this special arrangement and the use of some additional optical components, the measurements of yaw angle, small rotation, straightness become easy to implement. Experimental result shows that the displacement drift of this system is under 1 nm in the static measurement, while the Michelson interferometer system is more than 10 nm under the same condition. The angular interferometer based on this new structure, with electronic interpolation of $2\pi/516$, has a measurement resolution of $0.024 \mu\text{rad}$.

Key words measurement; heterodyne interferometer; differential plane mirror interferometer; dead path

OCIS codes 120.3930; 120.3180

1 引言

在军工、航天、数控机床等高科技领域,精密基准计量和几何量精密测量具有非常重要的作用,特别是直线度的测量技术,越来越引起人们的重视^[1-3]。激光外差干涉仪能够以简单的相位比较取得较高的测量分辨率,由于其具有结构简单,抗干扰能力强等优势,广泛应用于纳米精度以及亚纳米精度的测量技术领域^[4-6]。差分平面镜干涉仪

(DPMI)是20世纪80年代中期研制的一种新型激光干涉仪,它通过设定的参考平面镜和测量平面镜之间的光程变化来实现差动测量。其主要特点是光学分辨率高且能够使光程死区达到最小,具有较高的稳定性和测量精度,可完成各项参数的标准测量。传统的差分平面镜干涉仪的主要缺点是结构比较复杂,由于辅助光学元件较多,因此使得测量光束须经过多次反射,光束能量的减弱和偏振态的泄漏使得

收稿日期: 2014-05-04; **收到修改稿日期**: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(51075280)、上海市研究生创新基金(JWCXSL1302)

作者简介: 钟朝阳(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光干涉与纳米测量方面的研究。

E-mail: zhongchaoyang@sina.com

导师简介: 侯文玫(1950—),女,博士,教授,主要从事精密光学测量方面的研究。E-mail: houwenmei@vip.citiz.net

测量信号信噪比低,同时也影响了测量的精度。为了提高激光干涉仪作为测量传感设备的性能,人们一方面致力于消除干涉仪测量过程中的误差^[7-13],同时也发展出了各种不同形式的差分平面镜干涉仪^[14-17]。本文提出一种结构简单需要光学元件较少、稳定性好的差分平面镜干涉仪系统,可用于位移测量。如果附加其他光学元件,可轻易实现对偏摆角、微滚转角、直线度等几何量的测量。

2 光路设计和搭建

图 1 为用于位移测量的差分平面镜干涉仪原理图。激光源出射的光束中包含两个频率不同(f_1, f_2)偏振方向互相垂直的光,这种光源通常可以通过基于塞曼效应的稳频激光器、双纵模稳频或者是单稳频激光器通过声光调制器调制来实现。

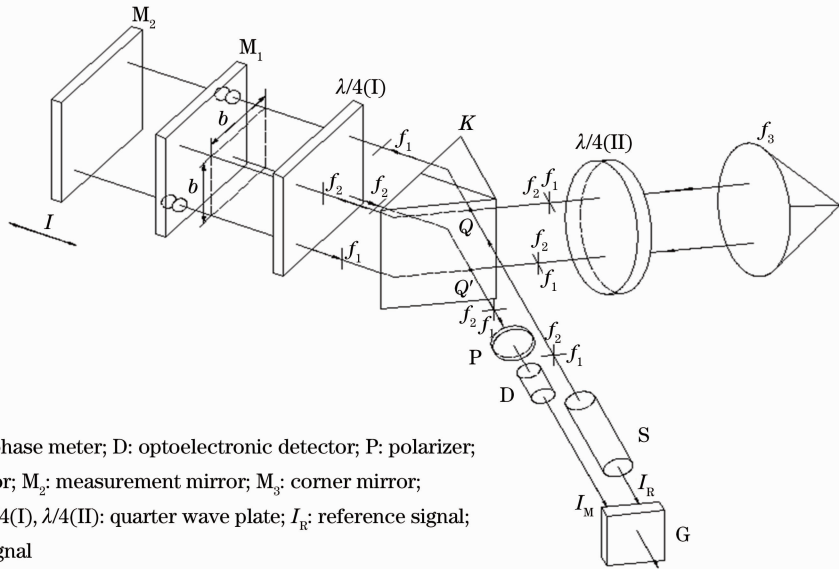


图 1 差分平面镜干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DPMI

设计的干涉仪系统包含一个 Koester 棱镜 K,从激光器出射的光入射至 K 上半部分的 Q 点,偏振方向互相垂直的光 f_1 和 f_2 经由 K 分开后平行出射,光束之间距离为 b 。频率为 f_1 光通过 1/4 波片(I)后,穿过参考镜 M_1 中的小孔入射到测量镜 M_2 ,并经 M_2 反射原路返回至 K。由于先后两次经过 1/4 波片,在 K 的偏振分光面处原先透射的 f_1 被反射通过 1/4 波片(II)入射至角隅棱镜 M_3 ,经过 M_3 反射与原光路平行出射(距离为 b)入射至 K 下半部分的 Q' 点,从 K 的偏振分光平面透射后,再次通过 1/4 波片(I),同样的穿过参考镜 M_1 中的小孔入射到测量镜 M_2 ,并经 M_2 反射原路返回至 K。频率为 f_2 的光经过 1/4 波片(I)后入射至参考镜 M_1 ,经 M_1 反射后沿原路返回至 K,在 K 的偏振分光面上原先反射的 f_2 被透射出棱镜通过 1/4 波片(II)入射至角隅棱镜 M_3 ,同样的经过 M_3 反射与原光路平行(距离为 b)入射至 K 下半部分的 Q' 点,原先透射的 f_2 光从 K 的偏振分光平面反射后再次通过 1/4 波片(I),同样入射至参考镜 M_1 并经 M_1 反射后沿原路

返回至 K。此时 f_1 和 f_2 经 K 合光后通过偏振轴与 f_1, f_2 偏振方向成 45° 的偏振片,由光电探测器接收经过偏振片后的干涉光束形成测量信号 I_M 。

当测量镜 M_2 移动时,干涉仪中的测量臂长度将发生变化,此时测量信号 I_M 将有 $\Delta\phi$ 的相位变化。由激光器引出的参考信号 I_R 和光电探测器接收到的测量信号 I_M 可分别表示为

$$I_R \approx A_{0R} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0R}], \quad (1)$$

$$I_M \approx A_{0M} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_{0M} + \Delta\Phi], \quad (2)$$

式中 A_{0R}, A_{0M} 是参考信号和测量信号的幅值大小, $\varphi_{0R}, \varphi_{0M}$ 分别是初始相位差, $\Delta\Phi$ 是由两干涉臂的不同而引起的相位差。光程差为

$$\Delta L = n_2 L_2 - n_1 L_1, \quad (3)$$

式中 L_1, L_2 是干涉仪两干涉臂的长度, n_1, n_2 是两干涉臂中空气的折射率(此处设 $n_1 = n_2 = 1$)。通过相位比相后可以得到测量信号 I_M 和参考信号 I_R 的相位差为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L. \quad (4)$$

对于图 1 所示的四倍光程干涉仪，相位差的变化 $\Delta\varphi$ 与 M_2 的移动距离 Δl 的关系可以表示为

$$\Delta l = \frac{\lambda}{8\pi} \Delta\varphi, \quad (5)$$

如果使用分辨率为 $2\pi/3600$ 的相位计，系统的分辨率可以达到 0.05 nm 。

差分平面镜干涉仪能把入射光束转为四束空间分离的偏振光平行出射，相同频率的两束光按对角线对称分布通过干涉光路中的参考镜和测量镜。由于干涉光路的完全几何对称，温度变化和机械振动对光学相位变化的影响将微乎其微，同时能够最大限度地减小死程误差。系统不但测量分辨率高，而且抗外界干扰能力强、稳定性好。

3 实验研究

由于所设计的系统是共光路结构，可以最大限度地消除死程误差以及减小测量过程中的热漂移带

来的影响，因此稳定性非常好。

为了验证系统的稳定性，搭建了如图 2 所示的实验装置。参考光路和测量光路用同一块反射镜 M_2 来代替图 1 光路中的测量镜和参考镜，这里保持 M_2 固定不动。在此装置中，干涉臂和测量臂长度始终保持不变。理想情况下，相位差的变化 $\Delta\varphi$ 不会发生变化。因此，通过 $\Delta\varphi$ 的漂移情况可以评判差动平面镜干涉仪的稳定性。以 500 Hz 的频率对 $\Delta\varphi$ 进行采样，测量结果如图 3 所示， Δl 的抖动小于 1 nm 。

同时，在使用相同激光器、光电接收器以及相位计的情况下，还测量了迈克耳孙干涉仪的稳定性。光源经过偏振分光镜分光后分别走过测量臂和参考臂，同样的让参考镜和测量镜都保持固定不动。对 $\Delta\varphi$ 进行采样，结果如图 4 所示。通过对测量结果进行对比，差分平面镜外差干涉仪相比传统的迈克耳孙干涉仪稳定性好，性能出色。

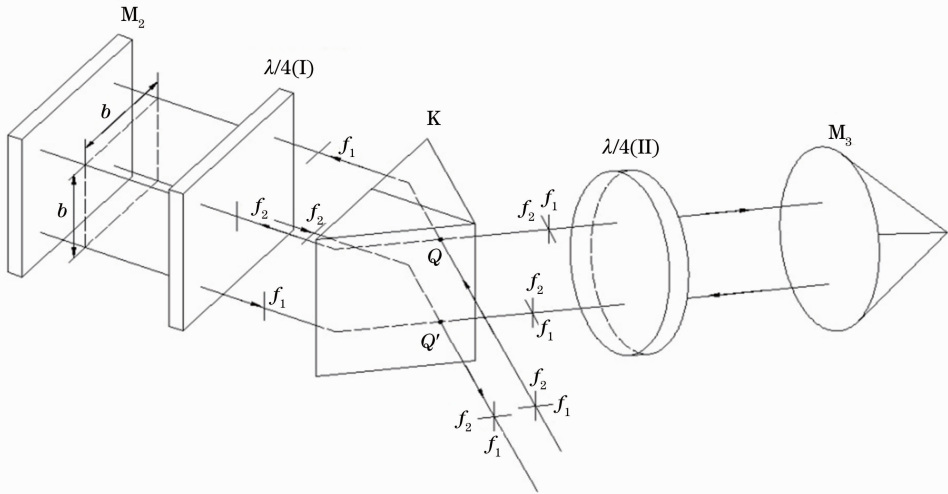


图 2 验证差分平面镜干涉仪稳定性原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement for DPMI stability inspection

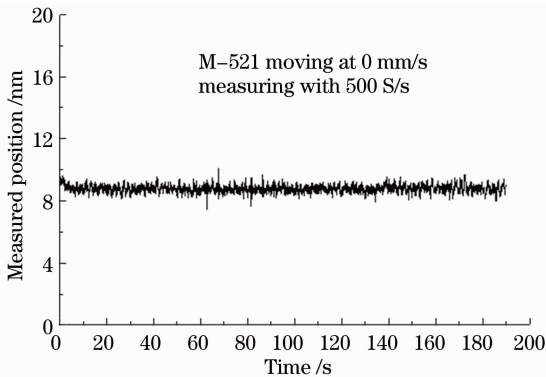


图 3 差分平面镜干涉仪稳定性测量曲线图

Fig. 3 Measured curve of the DPMI stability

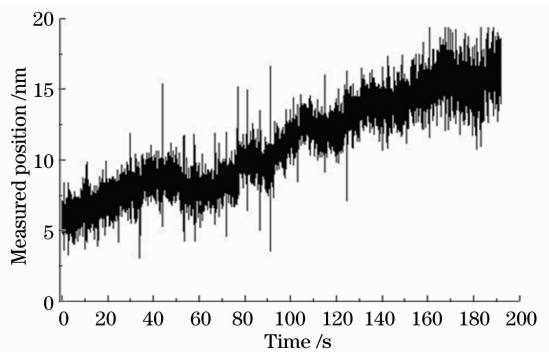


图 4 迈克耳孙干涉仪稳定性测量曲线图

Fig. 4 Measured curve of Michelson interferometer stability

为了验证系统在动态条件下的稳定性,同样使用如图 2 所示的光路进行测量。此时 M_2 不再是固定不动,而是以 0.1 mm/s 的速度随着位移台移动,位移台的行程大约是 20 mm 。一般情况下,在如此大的量程范围内,干涉仪两干涉臂的光程变化很大。然而,图 5 所示的测量结果表明虽然有 6 nm 的抖动,但是测量过程中几乎没有光学相位漂移。系统参考臂和测量臂光路结构呈完全几何对称,能够最大限度地减小外界干扰带来的影响。

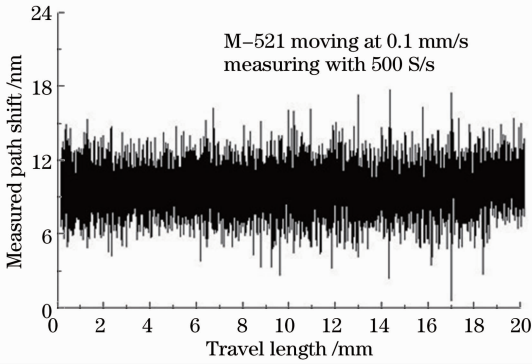


图 5 台子移动时差分平面镜干涉仪稳定性测量曲线图

Fig. 5 Measured curves of the DPMI stability as the stage moved

4 基于 DPMI 的角度测量系统

利用设计的差分平面镜干涉仪系统外加其他光学组件,可轻易实现诸如偏摆角、微滚转角、直线度等几何量的精密测量。例如,把图 1 中 M_1 和 $1/4$ 波片 (I) 这两个元件移除,系统就变成可测量绕 y 轴旋转的测角干涉仪(如图 6 所示)。当 $b=12.7 \text{ mm}$ 时,使用电子细分为 $2\pi/516$ 的相位计,它的分辨率可以达

到 $0.024 \mu\text{rad}$ 。用此测角干涉仪对纳米定位台 (Physik Instrumente GmbH 生产的 TCD-557) 绕轴旋转的角度进行测量,结果如图 7 所示。系统可作为诊断工具实时反馈机床或其他精密设备在运动过程中的角度误差,可用来校准纳米定位台。

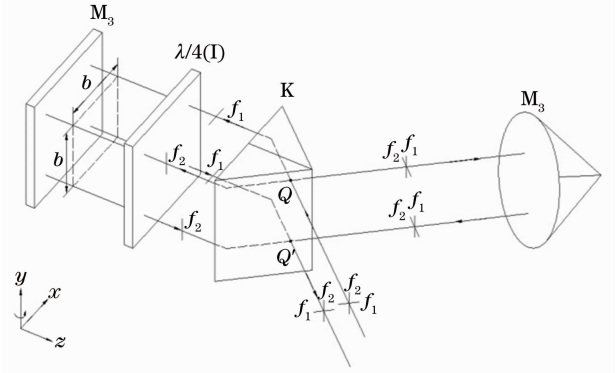


图 6 基于差分平面镜干涉仪的偏摆角测量干涉仪

Fig. 6 Yaw-angle interferometer based on DPMI

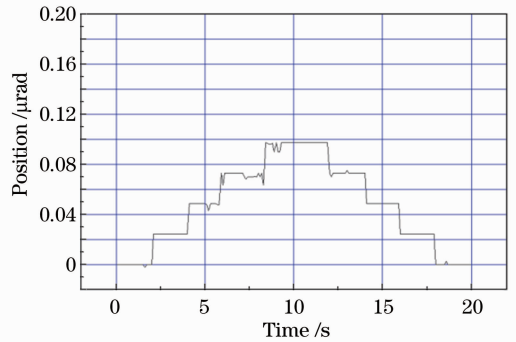


图 7 纳米定位台旋转的测量响应结果

Fig. 7 Measured response at rotation axis of positioning stage

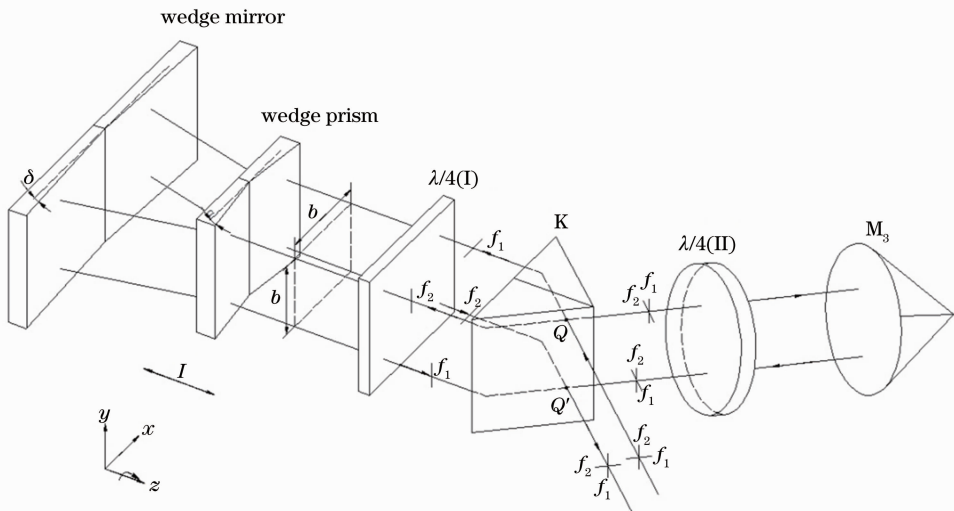


图 8 基于差分平面镜干涉仪的滚转角测量干涉仪

Fig. 8 Roll-angle interferometer based on DPMI

使用如图 8 所示的楔角棱镜和楔角反射镜分别代替图 1 所示的 M_1, M_2 , 这就形成了高精度滚转角测量干涉仪^[17]。

5 结 论

通过以上分析和实验,提出的新型差分平面镜干涉仪系统具有以下优点:1)系统结构简单,需要光学部件少。容易安装调试,容易产品化且成本较低,可以进一步拓展激光干涉仪市场。2)系统是共光路结构,死程误差小。3)系统是空间四光路对称结构,分辨率高,稳定性好,抗环境干扰能力强。静态条件下和动态条件下,系统的光学相位漂移都较小。4)附加别的组件,系统可轻易实现其他几何量的高精度测量。5)应用广泛,可用来校准各种数控机床和三坐标测量机,可用于控制光栅刻划工作台、高性能精密数控机床定位及其他定位装置如纳米测量定位工作台和扫描探针显微镜等,可作为诊断工具实时反馈精密设备运动过程中的角度误差等。

参 考 文 献

- 1 A Yacoot, M J Downs. The use of X-ray interferometry to investigate the linearity of the NPL differential plane mirror optical interferometer [J]. *Meas Sci Technol*, 2000, 11(8): 1126-1130.
- 2 Yang Pengqian, Stefan Hippler, Casey Deen, *et al.*. Smart and quantitative near-infrared point-diffraction interferometer based on the self-referencing wavefront sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0508001.
杨朋千, Stefan Hippler, Casey Deen, 等. 基于自参考的高精度红外点衍射干涉仪研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0508001.
- 3 Zhang Yongqin, Zhang Song, Deng Yong, *et al.*. Nd:YAG microchip laser feedback interferometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0302002.
张永芹, 张松, 邓勇, 等. Nd:YAG 微片激光回馈干涉仪[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302002.
- 4 B K A Ngoi, C S Chin. Self-compensated heterodyne laser interferometer [J]. *Adv Manuf Technol*, 2000, 16(3): 217-219.
- 5 J D Trolinger. Ultra high resolution interferometry [C]. SPIE, 1996, 2861: 114-123.
- 6 Kuang Cuifang, Feng Qibo, Zhang Bin, *et al.*. A novel method for measuring roll [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2006, 17(4): 468-470.
匡翠方, 冯其波, 张斌, 等. 一种新的滚转角测量方法[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(4): 468-470.

- 7 Chen Benyong, Mu Ruizhen, Zhou Yanjiang, *et al.*. Nonlinear error analysis of laser synthetic-wavelength nanomeasurement interferometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 240-244.
陈本永, 穆瑞珍, 周砚江, 等. 激光合成波长纳米测量干涉仪的非线性误差分析[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 240-244.
- 8 Hou Wenmei, Zhang Yunbo, Le Yanfen, *et al.*. Elimination of the nonlinearity of heterodyne interferometers [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0908006.
侯文玫, 张云波, 乐燕芬, 等. 外差激光干涉测长非线性误差的消除[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0908006.
- 9 Liu Binbin, Yuan Yonggui, Wang Xinxing, *et al.*. Real-time nonlinearity error correction method of polarizing laser interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2585-2589.
刘彬彬, 苑勇贵, 王新星, 等. 偏振激光干涉仪的非线性误差实时校正方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2585-2589.
- 10 Deng Yuanlong, Li Xuejin, Geng Youfu, *et al.*. Influence of nonpolarizing beam splitters on nonlinear error in heterodyne interferometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112008.
邓元龙, 李学金, 耿优福, 等. 非偏振分光镜对外差干涉仪非线性误差的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112008.
- 11 Wen Gang, Su Dongqi, Su Zhide, *et al.*. Analysis of random errors in high precision wavelength phase shifting interferometers by numerical simulation [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1008003.
文刚, 苏东奇, 苏志德, 等. 基于数值模拟的高精度波长移相干涉仪随机误差分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1008003.
- 12 Zhu Baohui, Zhang Chunmin, Lu Huidong, *et al.*. Error analysis of the moving mirror tilting in Michelson wind imaging interferometer with big optical path difference, wide field, achromatism and thermal compensation [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108001.
祝宝辉, 张淳民, 鲁辉东, 等. 大光程差、宽场、消色差、热补偿型迈克耳孙风成像干涉仪动镜倾斜误差分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108001.
- 13 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yan Su, *et al.*. Precise alignment of separated Sagnac interferometer [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0416001.
张学敏, 魏儒义, 闫肃, 等. 分体型萨格奈克干涉仪的精密装调[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0416001.
- 14 Ki-Nam Joo, Jonathan D Ellis, Eric S Buice, *et al.*. High resolution heterodyne interferometer without detectable periodic nonlinearity [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 1159-1165.
- 15 Juqun Yan, Dejiao Lin, Zhongyao Liu, *et al.*. Adjustable plane mirror interferometer adapted for microelectronic mask with different thickness [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2005, 13(1): 414-417.
- 16 Shigeru Hosoe. Highly precise and stable displacement-measuring laser interferometer with differential optical paths [J]. *Precision Engineering*, 1995, 17(4): 258-265.
- 17 Yanfen Le, Wenmei Hou, Kai Hu, *et al.*. High sensitive roll-angle interferometer [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(18): 3600-3603.

栏目编辑: 韩峰