

用于纳米测量的集成化单频激光干涉仪

李立艳 王 坚 韩春阳 苑勇贵 吴 冰 杨 军 苑立波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研究了一种基于偏振光的集成式单频激光干涉仪。利用偏振光学变换方法,实现了干涉仪的光学 4 细分结构,提高了测量灵敏度;构建 4 路正交探测结构,实现了干涉仪的无源偏振调制,扩大了干涉仪测量范围;采用光路集成化的设计方法,实现了一体化干涉仪光路集成。对激光干涉仪进行振动测量实验研究,结果表明,静态位移测量误差小于 ± 0.3 nm,振动测量的分辨率达 10 pm/Hz^{1/2};上述集成单频激光干涉仪具有测量精度高、稳定性好、动态范围宽、受环境影响小等优点,可被广泛用于纳米测量的各个领域。

关键词 测量;激光干涉仪;纳米测量;差动干涉;光路集成化

中图分类号 TH744.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0408001

Integration Single-Frequency Laser Interferometer Used to Nanometer Measurement

Li Liyan Wang Jian Han Chunyang Yuan Yonggui Wu Bing Yang Jun Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract An integrated single-frequency laser interferometer is researched based on polarized light theory. A four-subdivision configuration of the interferometer is achieved by using method of polarization states conversion which can improve the precision of the system. A four-orthogonal detection system is built up and the passive polarization modulation is accomplished which can expand the range of measurement. The integration of the interferometer is achieved by integration optical path. The vibration measurement experiments of the laser interferometer are carried out under laboratory condition. The error of the static displacement measurement is less than 0.3 nm, and the resolution of the vibration measurement reached is up to 10 pm/Hz^{1/2}. The results show that the integrated interferometer has advantages of high accuracy, good stability, large measurement range and resistance to environment effect. Therefore, the integrated interferometer can be widely used in various fields of nano measurement.

Key words measurement; laser interferometer; nanometer measurement; differential interferometry; integration optical path

OCIS codes 030.1670; 260.5430; 230.4320; 130.5440; 120.5050

1 引 言

纳米测量作为纳米科技的基础,涉及到微电子、材料科学等领域^[1]。激光干涉测量技术具有非接触性测量、测量精度高、速度快等优点,在纳米测量领域被广泛应用^[2]。激光干涉仪按工作光的频率可分为单频和双频两种。单频激光干涉仪与双频激光干涉仪相比,具有光路布局简单、非线性误差小等优点,

引起了国内外学者们的广泛关注。尤其是具有光学细分结构,采用偏振光移相技术和差分信号处理方法的单频激光干涉仪,较好地抑制了光强“零漂”对干涉仪造成的影响,提高了干涉仪的测量分辨率^[3]。

随着纳米测量技术的不断发展,要求激光干涉测量系统具有高稳定性和低漂移,对环境具有较强的适应能力^[4]。中国科学院长春光学精密机械与物

收稿日期:2010-09-21;收到修改稿日期:2010-12-07

基金项目:国家自然科学基金(60807032,60877046)、中央高校基础科研业务费专项基金(HEUCFZ1020)和黑龙江省自然科学基金重点项目(2D200810)资助课题。

作者简介:李立艳(1984—),女,硕士研究生,主要从事纳米精度激光干涉测量技术等方面的研究。

E-mail: llyswallow@126.com

导师简介:杨 军(1976—),男,博士,教授,主要从事高精度激光干涉测量和光纤传感技术等方面的研究。

Email: yangjun141@263.net(通信联系人)

理研究所的韩旭东等^[5]提出了一种共光路移相的单频激光干涉测长系统,解决了光强“零漂”问题,但是测量环境对干涉仪造成的影响达到64.5 nm。天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室赵美蓉等^[6]研制了一种光程差16倍频的纳米级精度激光干涉仪,实现了 $\lambda/1600$ 的分辨率(100电子细分),即如果采用He-Ne激光作为光源(波长为632.8 nm),则干涉仪的分辨率被限制为0.39 nm,由于没有采用正交光学差分探测结构限制了干涉仪分辨率的进一步提升。

本文在单频激光干涉仪集成及其性能检测方法的基础上^[7],研究了一种新型的用于纳米测量的单频激光干涉仪,它利用偏振光学变换的方法,实现了干涉仪的光学4细分结构,提高了测量灵敏度;构建了4路正交探测结构,实现了干涉仪的无源偏振调制,扩大了干涉仪的测量范围;采用光路集成化的设计方法,除唯一的测量反射镜外,实现了特征尺寸56.8 mm×50.8 mm×12.7 mm的一体化干涉仪光路集成。通过对集成化干涉仪性能的研究,证实此激光干涉仪可实现纳米精度的振动测量。

2 光学细分的单频激光干涉仪理论分析

具有4细分结构的单频偏振激光干涉仪由干涉仪测量装置及信号接收装置两部分组成,其光路布局如图1所示。单频激光通过与 x 轴成 45° 的起偏器P后变为一束线偏振光,经port0端口被偏振分光棱镜PBS1分束成透射P偏振分量与反射S偏振分量。P偏振分量经过 $\lambda/4$ 波片(QW1)后被测量反射镜M反射后入射到PBS1的表面,期间光束两次

经过QW1,光的偏振态发生一次改变,由P偏振分量变为S偏振分量,从而被PBS1反射至角锥棱镜RAP1中,经过RAP1的两次反射后,再次被PBS1反射,经过QW2后入射至反射镜M上,并被再次反射作为测量光束 E_m ;S偏振分量经过角锥棱镜RAP2两次反射后,被PBS1反射作为参考光束 E_r ;HW为半波片,NPBS为非偏振分光棱镜,测量光束与参考光束最终在port3~port6处形成相位互差 90° 的干涉信号^[8]。据琼斯矩阵理论^[9]可知

$$\begin{aligned} E_r &= J_{PBR} J_M J_{PBR} J_P E \exp(-i\varphi_r), \\ E_m &= J_{PBT} J_{-QW2} J_M J_{QW2} J_{PBR} J_M J_{PBR} J_{-QW1} J_M \times \\ &\quad J_{QW1} J_{PBT} J_P E \exp(-i\varphi_m), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 J 代表各元件琼斯矩阵的分量, φ_r 与 φ_m 分别代表参考光与测量光的相位。因此,干涉仪输出端port3~port6的光场矢量可表示为

$$\begin{cases} E_{port3} = J_{PBT} J_{NPBR} J_{HW} (E_r + E_m) \\ E_{port4} = J_{PBR} J_{NPBR} J_{HW} (E_r + E_m) \\ E_{port5} = J_{PBR} J_{QW(45^\circ)} J_{NPBT} J_{HW} (E_r + E_m) \\ E_{port6} = J_{PBT} J_{QW(45^\circ)} J_{NPBT} J_{HW} (E_r + E_m) \end{cases}, \quad (2)$$

将各光学元件在理想情况下的琼斯矩阵代入(2)式中,可得干涉仪各输出端口的光场矢量为

$$\begin{cases} E_{port3} = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 \begin{bmatrix} -\exp(-i\varphi_r) + \exp(-i\varphi_m) \\ 0 \end{bmatrix} \\ E_{port4} = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ \exp(-i\varphi_r) + \exp(-i\varphi_m) \end{bmatrix} \\ E_{port5} = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 \begin{bmatrix} 0 \\ \exp(-i\varphi_r) - i\exp(-i\varphi_m) \end{bmatrix} \\ E_{port6} = \frac{\sqrt{2}}{4} E_0 \begin{bmatrix} i\exp(-i\varphi_r) + \exp(-i\varphi_m) \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (3)$$

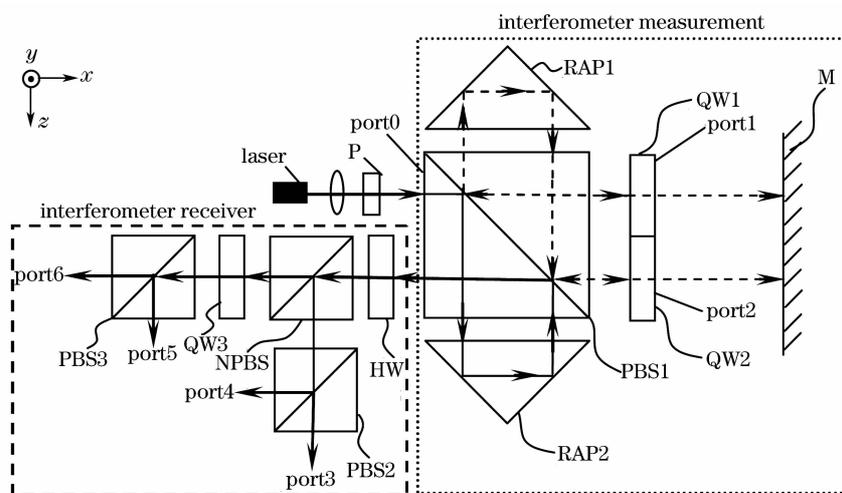


图1 具有4细分结构的单频偏振激光干涉仪原理图

Fig. 1 Schemes of single-frequency polarized laser interferometer with a four-subdivision configuration

由(3)式可得 port3~port6 端口在理想情况下的光强为

$$\begin{cases} I_{\text{port3}} = E_0^2 [1 - \cos(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \\ I_{\text{port4}} = E_0^2 [1 + \cos(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \\ I_{\text{port5}} = E_0^2 [1 - \sin(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \\ I_{\text{port6}} = E_0^2 [1 + \sin(\varphi_m - \varphi_r)]/4 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $I_{\text{port3}} \sim I_{\text{port6}}$ 输出信号的特征是相位互差 90° 的正交信号。其中 $\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_r$ 为参考光束和测量光束之间的相位差,由参考光束与测量光束之间的光程差决定。激光干涉相位与光路细分之间的关系为

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda/N}. \quad (5)$$

对于本光路而言,光折返了 4 次,因此 $N = 4$,则可知

$$\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_r = \frac{8\pi\Delta L}{\lambda}, \quad (6)$$

式中 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 为激光器的输出波长; ΔL 为参考臂和测量臂之间的光程差。采用差分信号处理方式,则有

$$\frac{I_{\text{port6}} - I_{\text{port5}}}{I_{\text{port4}} - I_{\text{port3}}} = \tan(\Delta\varphi) = \tan\left(\frac{8\pi\Delta L}{\lambda}\right). \quad (7)$$

由(7)式可知,此结构干涉仪在测量位移时,首先对 $(I_{\text{port6}} - I_{\text{port5}})/(I_{\text{port4}} - I_{\text{port3}})$ 的幅值进行量化采样,后利用查表方法对其求取反正切值得到 $\Delta\varphi$

的大小,再根据(6)式,得出位移值。由于采用(7)式所示的差动信号处理方法,可以实现 16384 倍的电子细分^[10],使激光干涉仪的测量分辨率达到了 10 pm 。

图 1 所示的单频激光干涉光路具有如下特点: 1)光路具有细分结构,可实现光程差 4 细分;2)干涉仪信号接收部分采用偏振移相技术及 4 通道接收装置,通过差动信号处理,减小了光强“零漂”及外界环境等因素对干涉仪测量结果造成的影响,并可极大地抑制共模噪声;3)整个光路布局简洁对称,光学元件之间采用光胶粘合技术,缩小了光学干涉仪的体积,提高了系统的稳定性和灵敏度。

3 激光干涉仪一体化集成

干涉仪一体化和集成化主要是指将光学元件的空间位置相对固定,而不需要额外的调节结构,是干涉仪实用化的前提。干涉仪集成化的目的是进一步减小外界环境对干涉仪造成的影响,提高干涉仪的稳定性。在干涉仪集成过程中主要的难点为如何消除由光学元件的位置及性能的非理想性导致的非线性误差^[8],集成干涉仪的原理如图 2 所示。根据干涉仪的上述特点,对干涉仪的元件的具体位置提出限定要求,如表 1 所述。

表 1 粘合元件位置要求

Table 1 Position requirement of optical components

No.	Device name	Label	Position requirements	Requirements of the position deviation
1	Polarization beam splitter	PBS1	Bottom in the x, z plane	Plane of incidence perpendicular to the direction of light incident
2	Cube-corner prism	RAP1	Bottom in the x, z plane, adhesive on the PBS1	Coplanar with the underside of PBS1
3	Cube-corner prism	RAP2	With the requirements of 2	Coplanar with the underside of PBS1
4	Quarter wave plate	QW1	Bottom in the y, z plane, adhesive on the PBS1	Along the direction of S, fast axis and y -axis clockwise rotation as $45.0^\circ \pm 0.2^\circ$
5	Quarter wave plate	QW2	With the requirements of 2	Along the direction of P, fast axis and y -axis counterclockwise rotation as $45.0^\circ \pm 0.2^\circ$
6	Half wave plate	HW	With the requirements of 4	Along the direction of light, fast axis and y -axis clockwise rotation as $22.5^\circ \pm 0.2^\circ$
7	Non-polarization beam splitter	NPBS	Bottom in the x, z plane, adhesive on the HW	Coplanar with the underside of PBS1
8	Polarization beam splitter	PBS2	Bottom in the x, z plane, adhesive on the NPBS	Coplanar with the underside of PBS1
9	Quarter wave plate	QW3	Bottom in the x, y plane, adhesive on the NPBS	Along the direction of light, fast axis and y -axis clockwise rotation as $45.0^\circ \pm 0.2^\circ$
10	Polarization beam splitter	PBS3	Bottom in the x, z plane, adhesive on the QW3	Coplanar with the underside of PBS1

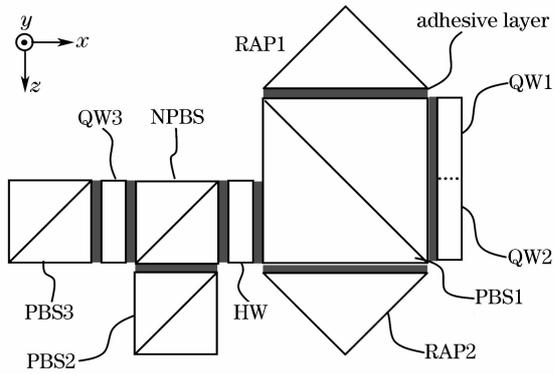


图 2 偏振干涉仪集成光路原理图

Fig. 2 Schemes of polarized laser interferometer integrated optical circuit

根据上述要求,提出光路集成方法如下:

1) 当 port0 端输入经过准直的 P 偏振光时, port1 端输出光强等于输入光强,而 port3~port6 端均无光输出;

2) 在 1) 的基础上,在 port1 端外利用金属反射镜将出射光按原路返回, port2 端空置,则 port2 端输出为圆偏振光;而 port3~port6 端均无光输出;

3) 在 2) 的基础上, port2 端外利用金属反射镜将出射光按原路返回,则 port3~port6 端的输出光强分别为 1:1:1:1;

4) 当 port0 端输入经过准直的 S 偏振光时, port1, port2 端无光输出;而 port3~port6 端的输出光强比值应该为 1:1:1:1;

5) 要求 3) 和 4) 两次测试时,从 port3~port6 端的输出光相互平行且重合。

在实际的集成过程中,当各端口的实际输出光强无法满足上述要求时,可以通过调整波片的位置,用以补偿偏振分光棱镜、波片等元件的性能和位置误差^[11];当端口间输出的分光比偏差小于 5%,总光强的透射率大于 95%时,可认为光学元件的位置符

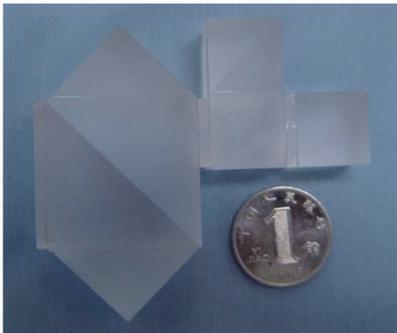


图 3 采用 12.7 mm 标准光学元件的集成光路

Fig. 3 Integrated interferometer makes up of 12.7 mm standard optical components

合要求。根据上述提出的集成原则及方法,调整好光学元件位置后,采用光胶胶合的方式,实现干涉仪光路的集成。集成后的光路尺寸为 56.8 mm × 50.8 mm × 12.7 mm,其实物如图 3 所示。

4 集成干涉仪性能评价

为了检测集成干涉仪的性能,搭建如图 4 所示的振动测量系统;系统中光源采用中心波长 632.8 nm,频率稳定度 10^{-9} 的 He-Ne 激光器,其输出光功率为 1.0 mW。整个干涉仪搭建在温度 (25 °C)、湿度(40%)、压强变化相对较小的千级超洁净实验室的防震气浮平台上。此自平衡气浮平台为韩国 DAEIL SYSTEM 公司生产的 DVIO 型气浮式光学隔振平台。干涉仪整体光路部分密封在一个纯黑色不透明的箱内,以此来减小外界振动和气流湍动等对干涉仪测量结果造成的影响。

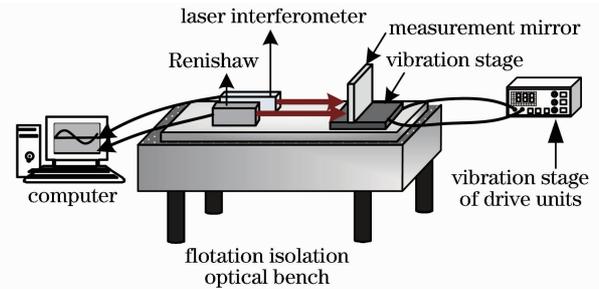


图 4 振动测量实验装置图

Fig. 4 Diagram of vibration measurement experimental equipment

4.1 集成干涉仪静态位移测量

为了验证具有细分结构的集成干涉仪的测量能力,实验采用哈尔滨工业大学博实公司生产的 MPT-1JRI 型纳米振动台在干涉仪的测量反射镜上加加载一定幅度的振动信号(纳米振动台的位移分辨

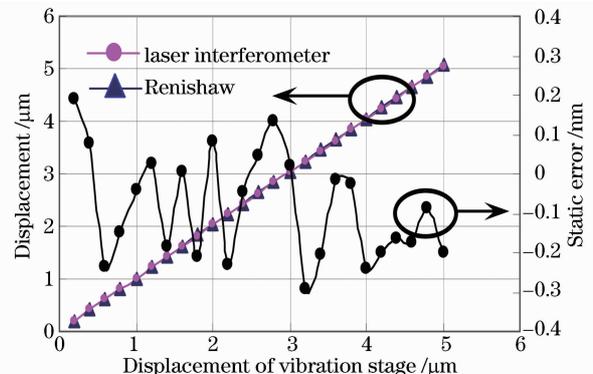


图 5 REL20 与集成干涉仪静态测量对比图

Fig. 5 Chart of REL20 and integrated interferometer static measurement experiment

率为1 nm,运动范围为15 μm),分别利用 Renishaw 公司生产的 REL20 激光尺(其测量分辨率为 0.038 nm)及上述的集成单频激光干涉仪对纳米振动台给定的同一振动信号同时进行测量,并将两种干涉仪测量到的位移值进行对比,测量结果如图 5 所示。

由图 5 的测量结果可知,两种干涉仪测量的线性

度一致,且集成干涉仪静态位移的最大测量误差在 ±0.3 nm之间。图中实验曲线的不规则变化主要是由于测量装置的不牢固以及测量环境变化等导致。

4.2 集成干涉仪动态位移测量

利用纳米微振动台,在 REL20 激光尺及集成干涉仪上同时加载幅度为597 nm,频率为30 Hz的正弦信号,两种干涉仪的测量结果如图 6 所示。

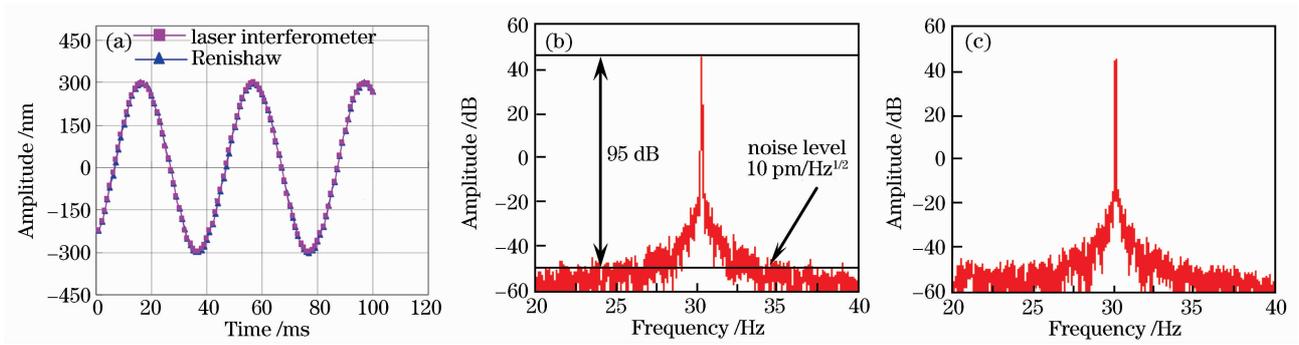


图 6 REL20 与集成干涉仪动态测量对比图。(a) 集成干涉仪与 Renishaw 干涉仪动态测量的时域图, (b) 集成干涉仪动态测量频域图,(c) Renishaw 干涉仪动态测量频域图

Fig. 6 Chart of REL20 and integrated interferometer dynamic measurement experiment. (a) chart of time domain integrated interferometer and Renishaw dynamic measurement, (b) chart of frequency domain integrated interferometer dynamic measurement, (c) chart of frequency domain Renishaw interferometer dynamic measurement

由上述动态测量时域结果可知,干涉仪的动态测量结果与 Renishaw 激光尺测量的结果一致,由振动测量的频域图可知,集成干涉仪的噪声本底为 -49 dB,测量信噪比为95 dB。由于现有的设备无法直接测量出皮米量级,因此采用功率谱等效的方法测量。通过实验标定,可得信号功率谱0 dB对应的测量位移为2.828 nm,根据功率谱公式,测量信号的信噪比(SNR, f_{SNR})为

$$f_{SNR} = 20\lg(x_m/x_{sensitivity}), \quad (8)$$

式中 x_m 为测量信号的幅度, $x_{sensitivity}$ 为测量灵敏度。可得干涉仪振动测量分辨率达10 pm/Hz^{1/2}。

4.3 集成干涉仪的测量稳定性

对于纳米测量系统而言,其测量稳定性尤为重要。为了检测激光干涉仪测量系统的稳定性,在上述实验环境下,给干涉仪加载幅度为1 μm,频率为20 Hz的信号,通过(8)式的计算,可得到测量位移幅值。数据每隔20 min记录一次,共历时4 h,实验数据如表 2 所示。

表 2 稳定性实验测量数据

Table 2 Data of stability test measurements

Time /min	Backgroundnoise /dB	Signal amplitude /dB	Load displacement amplitude /nm	Measuring displacement amplitude /nm
0:00	-49.00	50.9714	1000.000	1000.114
0:20	-49.00	50.9699	1000.000	999.941
0:40	-49.00	50.9699	1000.000	999.941
1:00	-49.00	50.9692	1000.000	999.860
1:20	-49.00	50.9698	1000.000	999.930
1:40	-49.00	50.9713	1000.000	1000.102
2:00	-49.00	50.9704	1000.000	999.999
2:20	-49.00	50.9712	1000.000	1000.091
2:40	-49.00	50.9703	1000.000	999.987
3:00	-49.00	50.9702	1000.000	999.976
3:20	-49.00	50.9713	1000.000	1000.102
3:40	-49.00	50.9706	1000.000	1000.022
4:00	-49.00	50.9720	1000.000	1000.183

由表 2 中的数据可知,具有细分结构的干涉仪测量位移幅度变化在 0.2 nm 之间,此干涉仪具有测量精度高、稳定性好的优点。

5 结 论

研究了一种用于纳米测量的激光干涉仪,并对其进行了振动测量实验研究,结果表明其静态位移测量误差小于 0.3 nm,测量分辨率可达到 10 pm/Hz^{1/2}。集成的干涉仪具有光路尺寸小、测量精度高、稳定性好、受环境影响小及调节方便等优点,便于在实际测量中应用。

参 考 文 献

- 1 Zhou Shaolin, Yang Yong, Chen Wangfu *et al.*. Dual-grating-based nanometer measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3):702~706
周绍林,杨 勇,陈旺富等. 基于双光栅的纳米测量方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3):702~706
- 2 U. Brand, K. Herrmann. A laser measurement system for the high precision calibration of displacement transducers [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1996, **7**(6):911~917
- 3 N. Bobroff. Recent advances in displacement measuring interferometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1993, **4**(9):907~926
- 4 Wu Jian, Lin Dejiao, Yin Chunyong *et al.*. Interferometer and nanometer positioning integration system used for drift reduction [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):707~710
吴 健,林德教,殷纯永等. 用于减少漂移的纳米定位干涉仪集成系统[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):707~710
- 5 Han Xudong, Ai Hua. Common-path and phase-shifting single frequency laser interferometer for length measurement [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(2):195~198
韩旭东,艾 华. 共光路移相单频激光干涉测长系统[J]. *光学技术*, 2004, **30**(2):195~198
- 6 Zhao Meirong, Qu Xinghua, Lu Boyin. OPD multiplied new laser interferometer with nanometric accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(5):431~434
赵美蓉,曲兴华,陆伯印. 光学差倍增的纳米级精度激光干涉仪[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(5):431~434
- 7 Liu Binbin, Li Liyan, Yang Jun *et al.*. Optical circuit integrated method of single-frequency polarization laser interferometer using for nanometer measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10):2582~2587
刘彬彬,李立艳,杨 军等. 用于纳米测量的单频偏振激光干涉仪的光路集成方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10):2582~2587
- 8 Yang Jun, Liu Zhihai, Yuan Libo. Effects of wave plate on nonlinear errors in polarization laser interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):364~369
杨 军,刘志海,苑立波. 波片对偏振激光干涉仪非线性误差的影响[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2):364~369
- 9 Liao Yanbiao. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003
廖延彪. *偏振光学*[M]. 北京:科学出版社, 2003
- 10 Liu Binbin, Yuan Yonggui, Wang Xinxing *et al.*. Real-time nonlinearity error correction method of polarizing laser interferometer [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
- 11 Jeongho Ahh, Jong-Ahn, Chu-Shik Kang. A passive method to compensate nonlinearity in a homodyne interferometer [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25):23299~23308