

# 光纤激光器自混合干涉微位移测量研究

郝 辉,何向东,郭冬梅

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏省光电技术重点实验室,南京 210023)

**[摘要]** 研究了光纤激光器自混合干涉效应测量微位移的方法. 为提高自混合干涉的微位移传感测量精度,将正弦相位调制方法引入光纤激光器自混合干涉测量. 光纤激光器外腔中使用相位调制器调制自混合干涉信号. 采用四象限积分技术解调外腔相位得到位移测量结果,与高精度微位移平台位移参数对比,验证传感测量方法的可行性. 位移测量精度远优于半个波长. 此方法对全光纤高精度位移传感应用有重要意义.

**[关键词]** 自混合干涉,光纤激光器,微位移测量,相位调制

**[中图分类号]** TN24 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2014)04-0046-05

## Micro-displace Measurement Based on Self-mixing Interference of Fiber Laser

Hao Hui, He Xiangdong, Guo Dongmei

(Jiangsu Key Lab on Opto-Electronic Technology, School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Micro-displacement measurement based on self-mixing interference using a fiber laser system is demonstrated. Sinusoidal phase modulation technique is introduced into the fiber laser self-mixing interference measurement system to improve the measurement resolution. The phase can be demodulated by four-integrating-bucket method. Error sources are evaluated in detail, and the system is experimentally applied to reconstruct the motion of a high-precision commercial translation stage. The displacement measurement accuracy is well beyond one half wavelength. It provides a practically solution for displacement measurement based on all fiber sensing applications with high precision.

**Key words:** self-mixing interference, fiber laser, micro-displace measurement, phase modulation

激光器出射光被外部物体反射或散射,一部分光重新进入谐振腔,引起激光器输出功率和频谱的变化,这种效应称为自混合干涉效应(Self-Mixing Interference, SMI)<sup>[1]</sup>. 由于自混合干涉信号携带了外部物体的信息,自混合干涉效应可以被用来测量外部物体的速度、位移、振动和绝对距离等参量<sup>[2-7]</sup>. 20 世纪 70 年代以来,光纤激光器的制造技术日趋成熟,促进了光纤通信、光纤传感等领域的飞速发展. 由于光纤激光器具有输出功率高、窄线宽、与光纤系统完全匹配等优点,逐渐成为通信和传感系统的理想光源. 基于光纤激光器的自混合干涉传感技术也引起了众多学者的关注,如利用光纤激光器自混合干涉进行速度<sup>[8]</sup>、位移<sup>[9]</sup>及远程振动传感测量<sup>[10]</sup>. 直接分析自混合干涉信号的波形变化,可以获得半个波长的位移测量精度,但这并不能满足微位移测量中高精度测试的需求. Sasaki 教授最早提出在迈克尔逊干涉仪中的参考光路中,用一个压电陶瓷正弦调制参考光路的光程,进行正弦调制干涉相位,通过解调信号达到提高测量精度的目的<sup>[11]</sup>. 为了进一步提高自混合干涉测量精度,本文把正弦相位调制技术引入到环形光纤激光器自混合干涉测量中<sup>[7,12]</sup>,置于外腔中的光纤型相位调制器实现对干涉信号的正弦相位调制,采用四象限积分技术解调外腔相位,并且通过位移测量结果与高精度微位移平台参数的一致性,验证测量方法的可行性. 位移测量精度远优于半个波长. 光纤激光自混合干涉信号强,信噪比高,可采用长光纤进行传输和复用,并有望形成全新的基于光反馈的光纤有源传感网络,实现速度、位移及振动的非接触测量,在石油化工、航空

收稿日期:2014-07-13.

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20140925)、江苏省高校自然科学研究项目(14KJB510015).

通讯联系人:何向东,讲师,研究方向:光电子技术. E-mail:hexiangdong@njnu.edu.cn

航天、环境监测和机械工程等领域具有重要应用前景.

## 1 传感测量原理

光纤激光器自混合干涉系统工作在弱光反馈条件下时,忽略光在外腔中的多重反馈效应的影响,激光器输出强度可以表示为<sup>[7]</sup>

$$I = I_0 [1 + m \cos(\phi(t))], \quad (1)$$

式(1)中  $I_0$  为无光反馈时激光器的输出光强,  $m$  为干涉条纹对比度,  $\phi(t)$  为光束在外腔中的相位延迟. 在激光器外腔中利用光纤型相位调制器施加正弦调制, 调制函数表示为:

$$\varphi(t) = a \sin(2\pi f_m t + \beta), \quad (2)$$

式(2)中  $a$  表示调制深度,  $f_m$  为调制频率,  $\beta$  初始相位. 经过正弦相位调制后的激光器输出的自混合干涉信号可以表示为:

$$I(t) = I_0 \{1 + m \cos[\phi(t) + a \sin(2\pi f_m t + \beta)]\}, \quad (3)$$

对式(3)展开有

$$\begin{aligned} I(t) = & I_0 + m I_0 \cos\phi J_0(a) + m I_0 \cos\phi \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(a) \cos((2n)(2\pi f_m t + \beta)) \right] - \\ & m I_0 \sin\phi \left[ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{(2n+1)}(a) \sin((2n+1)(2\pi f_m t + \beta)) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

令

$$\begin{aligned} p &= I_0 + m I_0 \cos\phi J_0(a), \\ q(t) &= m I_0 \cos\phi \left[ 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(a) \cos(2n(2\pi f_m t + \beta)) \right], \\ r(t) &= -m I_0 \sin\phi \left[ 2 \sum_{n=0}^{\infty} J_{(2n+1)}(a) \sin((2n+1)(2\pi f_m t + \beta)) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

自混合信号表示为

$$I(t) = p + q(t) + r(t). \quad (6)$$

引入四象限积分技术<sup>[12]</sup>来解调相位  $\phi(t)$ , 即在调制信号的每个周期  $T$  中 ( $T = 1/f_m$ ), 自混合干涉光强被积分 4 次, 积分时间为  $T/4$ , 令

$$C_i = \int_{(i-1)T/4}^{iT/4} I(t) dt = \int_{(i-1)T/4}^{iT/4} [p + q(t) + r(t)] dt = P_i + Q_i + R_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 = P_3 = P_4 = [I_0 + m I_0 \cos\phi J_0(a)] T/4, \\ Q_1 &= Q_3 = 2m I_0 T \cos\phi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(a) \sin 2n\beta [(-1)^n - 1] / 4n\pi, \\ Q_2 &= Q_4 = -2m I_0 T \cos\phi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(a) \sin 2n\beta [(-1)^n - 1] / 4n\pi, \\ R_1 &= -2m I_0 T \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(a) [\cos(2n-1)\beta + (-1)^n \sin(2n-1)\beta] / (4n-2)\pi, \\ R_2 &= -2m I_0 T \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(a) [\cos(2n-1)\beta - (-1)^n \sin(2n-1)\beta] / (4n-2)\pi, \\ R_3 &= 2m I_0 T \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(a) [\cos(2n-1)\beta + (-1)^n \sin(2n-1)\beta] / (4n-2)\pi, \\ R_4 &= 2m I_0 T \sin\phi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(a) [\cos(2n-1)\beta - (-1)^n \sin(2n-1)\beta] / (4n-2)\pi, \end{aligned} \quad (8)$$

将  $C_i$  线性组合, 可以得到:

$$\begin{aligned} X &= C_1 + C_3 - C_2 - C_4 = -8m I_0 T H_X \cos\phi, \\ Y &= C_1 + C_2 - C_3 - C_4 = -8m I_0 T H_Y \sin\phi, \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$H_X = \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(a) \sin 2n\beta [1 - (-1)^n] / 4n\pi, \quad (11)$$

$$H_Y = \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(a) \cos(2n-1)\beta / (4n-2)\pi,$$

则相位  $\phi(t)$  可以由以下关系式得到:

$$\phi = \arctan(Y \cdot H_X / X \cdot H_Y). \quad (12)$$

采用四象限积分方法解调得到的目标包裹相位  $\phi(t)$  在  $-\pi/2$  和  $\pi/2$  之间, 对其进行去包裹处理之后, 再根据相位  $\phi(t)$  和外腔长度  $D$  之间的关系, 就可以得到外部物体的位移, 其中,  $\lambda_0$  为真空中的波长,  $n$  为空气的实际折射率, 就可以得到外反射靶的位移情况. 采用四象限积分方法进行相位解调时, 相位调制器的正弦调制的初始相位和幅度选取值为:  $\beta = 56^\circ$ ,  $a = 1.23$  [12].

## 2 仿真结果

为验证相位解调方法的可行性, 对位移重构的过程进行了数值模拟, 并对可能的误差来源及其对位移测量精度的影响进行了数值分析. 图 1(a) 为由计算机模拟的目标物体的正弦位移, 运动的频率 20 Hz, 幅值为 6  $\mu\text{m}$ . 相位调制器的调制频率为 8 kHz, 采样频率为 160 kHz, 光纤激光器波长为 1 550 nm, 条纹对比度为 0.1. 解调出的目标物体的包裹相位如图 1(b), 经去包裹处理后利用相位  $\phi$  和外腔长度之间的关系得到的位移重构的结果.

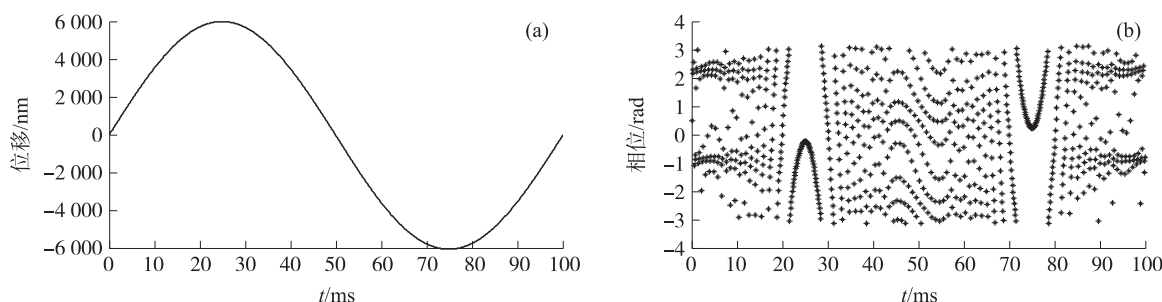


图 1 (a) 模拟目标正弦位移 (b) 目标物体的包裹相位

Fig. 1 (a) Simulated displacement of the target (b) The extracted phase

考虑误差主要来源于以下几个方面:

(1) 由于计算导致的截断误差, 采用式(13)来计算位移测量误差的标准差:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (L_{im} - L_{ir})^2 / (n-1)}, \quad (13)$$

其中  $L_{im}$  为第  $i$  个测量点的位移测量结果,  $L_{ir}$  为该点的实际位移,  $n$  为测量过程中的采样点数. 四象限积分法解调相位, 由于计算导致的最大误差为 0.51 nm, 标准差为 0.13 nm.

(2) 在此系统当中, 相位调制器的调制不稳定性会导致相移产生偏离, 正弦相移幅度的随机起伏会在系统进行位移测量时引入误差. 假定正弦相移自混合干涉信号经后续电路处理得到的交流分量由下式表示:

$$s(i) = s_0 \cos[\phi + \varphi(i)], \quad (14)$$

在考虑了相位调制器不稳定性的因素后, 式(14)可以改写为

$$s(i) = s_0 \cos\{\phi + [\varphi(i) + \delta_a(i)]\}, \quad (15)$$

其中  $\delta_a(i)$  是 1 个依赖于时间的均值为 0、方差为  $\sigma_a^2$  的高斯噪声, 图 2 和图 3 给出了不同噪声方差  $\sigma_a^2$  水平下, 位移测量标准差与正弦相移幅度  $a \in [0.25, 1.75]$  的关系曲线. 由图 2 的结果我们可以发现, 位移测量标准差随着  $\sigma_a$  的增加呈现线性增大的趋势, 对于某 1 个噪声强度水平下, 位移测量标准差在  $a = 0.25$  rad 处达到最大值, 当  $a$  逐渐增大并趋近 1 rad 时位移测量标准差迅速地衰减至 1 个比较稳定的值, 并随着  $a$  的进一步增加而增大. 为了使调制深度  $a$  的变化对位移测量结果的影响最小, 理想的正弦相

移幅度的取值应该为曲线的极值位置,此时,系统对于相位调制器调制噪声的灵敏度最低。

(3)在四象限法解调相位的方法中,调制信号的初始值对解调结果有影响,由调制信号初始相位与设置值之间的误差也会影响该算法的测量精度,由于调制信号初始相位导致的位移测量误差,模拟结果见图3,图中可以看出,该相位解调算法对相位调制器调制的初始相位精度也较为敏感,当调制初始相位误差达到0.1 rad时,导致的位移测量标准差大约为13 nm左右。

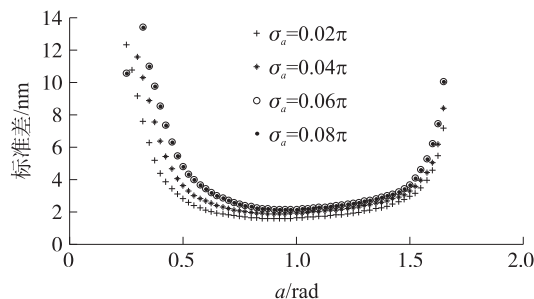


图2 位移测量标准差与相位调制器正弦相移幅度  $a$  及噪声方差  $\sigma_a$  之间的关系

Fig.2 Standard deviation of the reconstructed displacement versus  $a$  and  $\sigma_a$

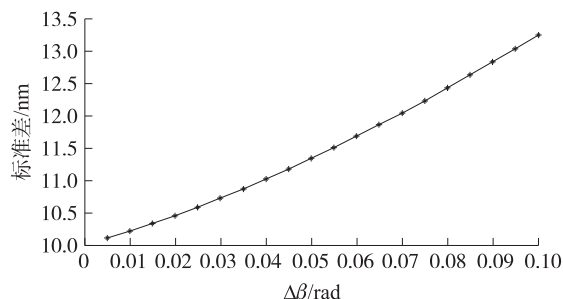


图3 相位调制器调制初始相位误差与位移测量标准差关系

Fig.3 Standard deviation of the reconstructed displacement caused by initial phase error of the modulation

### 3 实验结果

相位调制型环形光纤激光器自混合干涉位移测量系统实验装置如图4所示。环形腔光纤激光器由掺铒光纤、泵浦源隔离器、分布反射布拉格光栅、耦合器等构成。980 nm 泵浦光源的功率为140 mW,通过波分复用器(WDM)泵浦一段10 m的掺铒光纤,激光器中使用的光纤布拉格光栅(FBG)反射波长为1 550 nm,反射率为93%,带宽小于0.3 nm。使用两个环形器把出射光和接收的反射光分开<sup>[13]</sup>,这样的方案确保激光器和相位调制器的隔离,避免寄生反馈进入激光器谐振腔。

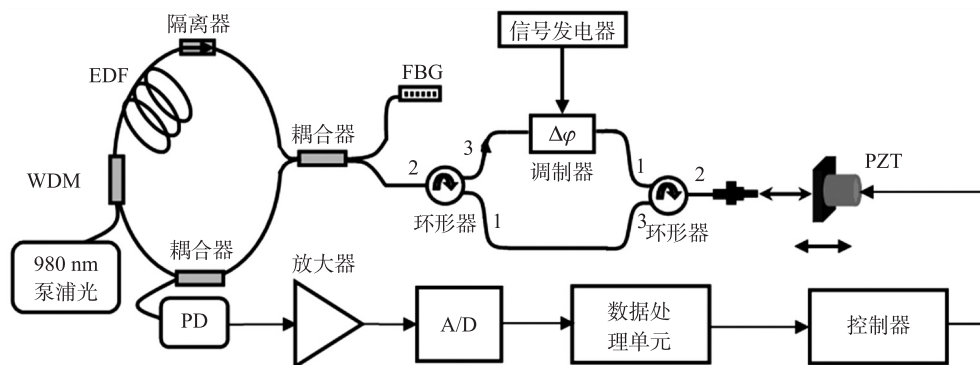


图4 正弦相位调制自混合干涉微位移测量系统的实验装置示意图

Fig.4 The experimental setup diagram

相位调制器(Optiphase, inc.),由压电陶瓷拉伸缠绕的光纤实现相位调制,与光的偏振方向无关。PZ1上驱动电压幅度控制调制深度,驱动电压的频率控制调制频率,该调制器的调制带宽为100 kHz。实验中使用信号发生器(泰克,3021G)来驱动PZ1型相位调制器。目标物为1个硅片,贴在微动平移台上(PI,P-762.2L),定位精度可达1 nm。自混合干涉信号经光电探测器检测、放大(New Focus, 1611 module),然后通过数据采集卡采集(National Instrument, NI PCI-6251),采集得到的数据由数据处

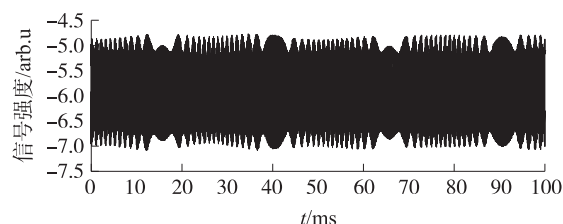


图5 调制后的自混合干涉信号

Fig.5 The interference signal

理单元来处理.

图 5 为正弦调制后的自混合干涉信号.

控制微动平移台做频率为 20 Hz 正弦运动和三角波形运动,对应的幅值分别为 6 000 nm 和 3 000 nm. 相位调制器调制频率为 10 kHz,采集卡采样频率为 200 kHz,恢复的位移信号如图 6 所示.

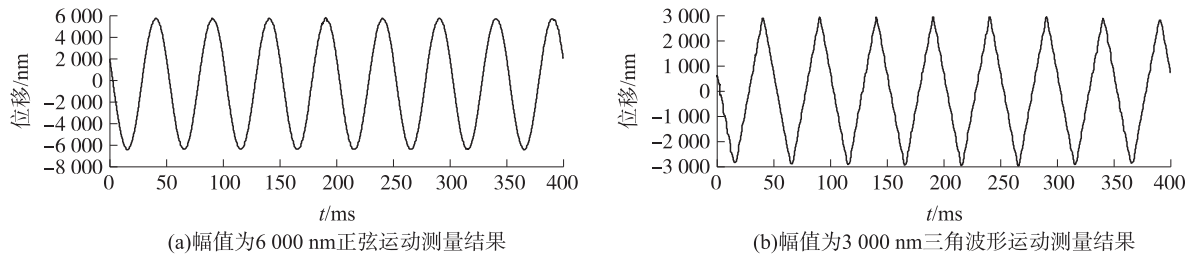


图 6 微动平台频率 20 Hz

Fig. 6 Displacement reconstruction result (a) sinusoidal form with frequency 20 Hz and amplitude 6  $\mu\text{m}$   
(b) triangular form with frequency 20Hz and amplitude 3  $\mu\text{m}$

改变微动平台运动参数,得到表 1 位移测量的结果.

表 1 微动平台位移测量结果  
Table 1 The measurement result

序号	运动幅值/nm	运动频率/Hz	运动波形	峰值最大重构误差/nm
1	2 000	5	正弦	37.4
2	2 000	5	正弦	16.4
3	4 000	10	正弦	118.9
4	6 000	10	正弦	107.1
5	6 000	20	正弦	117.4
6	2 000	10	三角波形	10.4
7	3 000	10	三角波形	8.3
8	3 000	20	三角波形	35.5

表 1 为测量结果,从以上实验结果可以看出,四象限积分法可以有效地解调正弦相位调制自混合干涉信号,通过和精密微动平台的运动做比对发现,在 6  $\mu\text{m}$  的运动范围内,恢复得到的位移信号的峰值误差的最大值为约为  $\lambda/13$ ,远优于  $\lambda/2$ .

4 结论

本文研究了光纤激光器自混合干涉进行高精度位移测量方法,实验系统利用相位调制器调制自混合干涉信号,采用四象限积分法解调干涉信号. 对比位移测量结果和微动平台的运动参数,恢复的峰值误差远优于半个波长. 实验系统易于搭建、精度高、成本低,在光纤传感中有重要的应用前景.

[ 参考文献 ]

[ 1 ] Wang W M, Boyle W J O, Grattan K T V, et al. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[ J ]. Appl Opt, 1993, 32( 9 ) : 1 551-1 558.

[ 2 ] Gouaux F, Servagent N, Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer[ J ]. Appl Opt, 1998, 37( 28 ) : 6 684-6 689.

[ 3 ] Shinohara S, Hirofumi Yoshida, Hiroaki Ikeda, et al. Compact and high-precision range finder with wide dynamic range and its application[ J ]. IEEE Trans Instrum Meas, 1992, 41( 1 ) : 40-44.

[ 4 ] Guido Giuliani M N, Silvano Donati, Thierry Bosch. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[ J ]. J Opt A- Pure Appl Op, 2002, 4: 283-294.

[ 5 ] Liu G, Zhang Shulian, Zhu Jun, et al. Theoretical and experimental study of intensity branch phenomena in self-mixing interference in a He-Ne laser[ J ]. Opt Commun, 2003, 221( 4/6 ) : 387-393.

( 下转第 58 页 )

- [14] 舒强,舒永春,张冠杰,等. 调制掺杂 GaAs/AlGaAs 2DEG 材料持久光电导及子带电子特性研究[J]. 物理学报,2006,55(3):1 379-1 383.
- [15] Kim K T, Lee S S, Chuang S L. Inter-miniband optical absorption in a modulation-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  superlattice[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(9):6 617-6 624.
- [16] Ozturk E, Sokmen I. Intersubband transitions for single, double and triple Si  $\delta$ -doped GaAs layers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(20):2 457-2 464.
- [17] Ozturk E, Sokmen I. Intersubband optical absorption of double Si  $\delta$ -doped GaAs layers[J]. Superlattices and Microstructures, 2004, 35(1):95-104.
- [18] 杨双波. 掺杂浓度及掺杂层厚度对 Si 均匀掺杂的 GaAs 量子阱中电子态结构的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(15):157 301(1-7).
- [19] 余瑞兰, 蔺玉柱, 崔光磊. 用 Numerov 算法求解一维无限深势阱的本征问题[J]. 巢湖学院学报, 2003, 3:43-47.

[责任编辑:顾晓天]

(上接第 50 页)

- [6] Scalise L, Yu Yang, Guido Giuliani, et al. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2004, 53(1):223-232.
- [7] Guo D, Wang M, Tan S. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. Opt Express, 2005, 13(5):1 537-1 543.
- [8] Daofu H, Ming W, Junping Z. Self-mixing speckle in an erbium-doped fiber ring laser and its application to velocity sensing[J]. IEEE Photonic Tech L, 2007, 9(18):1 398-1 400.
- [9] Dai X, Wang M, Zhao Y, et al. Self-mixing interference in fiber ring laser and its application for vibration measurement[J]. Opt Express, 2009, 17(19):16 543-16 548.
- [10] Liang Lu, Cao Zhigang, Dai Jijun, et al. Self-mixing signal in  $\text{Er}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$  codoped distributed bragg reflector fiber laser for remote sensing applications up to 20 km[J]. IEEE Photonic Tech L, 2012, 24:392-394.
- [11] Sasaki O, Okazaki H. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement[J]. Appl Opt, 1986, 25(18):3 137-3 140.
- [12] Guo D, Wang M. Self-mixing interferometry based on sinusoidal phase modulation and integrating-bucket method[J]. Opt Commun, 2010, 283(10):2 186-2 192.
- [13] Ovaryn B, Andrews J H. Phase-shifted laser feedback interferometry[J]. Opt Lett, 1998, 23(14):1 078-1 080.

[责任编辑:顾晓天]