

两路反馈外腔结构激光自混合干涉理论及实验观察

宦海 张雨* 卢松 黄凌霄

南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 考虑激光器外腔由在不同方面上的独立运动的反射镜构成,形成多路反馈时所产生的自混合干涉(SMI)现象,运用光干涉的基础理论,结合激光自混合干涉理论对弱光反馈条件下的多路反馈外腔(MFEC)结构的自混合干涉理论进行研究。基于两路反馈外腔结构,构造了一个含有两路反馈外腔结构的自混合干涉模型,并对所提出的结构进行理论分析及数值仿真。得出在弱光反馈条件下,两路反馈外腔结构的自混合干涉信号类似于低频率正弦相位调制的激光自混合干涉信号,为幅度周期性变化的类正弦波或类锯齿波,其干涉信号波形形状由外部反馈的强弱决定,且一个周期内的波形信号疏密程度不同。搭建相关实验系统,对仿真结果进行了验证。

关键词 测量;多路反馈;平面波干涉;自混合干涉

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.061202

Theoretical and Experimental Study on Laser Self-Mixing Interference with Two Feedback External Cavity

Huan Hai Zhang Yu Lu Song Huang Lingxiao

School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract The external cavities of laser formed by independent movement reflectors in different directions is considered, the self-mixing interference (SMI) effect with multiway feedback is investigated. The basic theory of SMI with multiway feedback external cavity (MFEC) can be obtained by the theory of interference and the theory of laser SMI. Based on the external cavity structure with two feedback, a SMI model with two feedback external cavity structure is proposed. The expressions of the phase and output power in the MFEC are deduced and some simulations are made under different conditions. It is found that the output of the SMI system with two external cavities in different directions is sinusoidal or sawtooth waves, which is similar to the signal of SMI by low frequency sinusoidal phase modulation. The density of interference waves is uneven in one period and the shape of the interference wave is determined by the intensity of the external feedback. A SMI with two feedback external cavity experiment system is setup, and the experiment results testifies the validity of simulations.

Key words measurement; multiway feedback; plane wave interference; self-mixing interference

OCIS codes 120.3180; 120.4630; 140.4130

1 引言

激光自混合干涉(LSMI)是指激光器发出的探测光被外部物体反射或散射,部分光反馈并耦合至内激光腔,反馈光和激光腔内的光混合并调制激光器的输出,形成自混合干涉(SMI)效应^[1-2]。20世纪80年代以来,随着激光技术和计算机技术的发展,激光自混合干涉因其信号携带了外部物体的信息被广泛应用于测量领域,主要包括速度测量、绝对距离测量、位移测量、振动测量、角度测量、形貌测量和激光器物理量估算等^[3-10]。

现阶段国内外学者的研究方向主要集中在:1)激光自混合干涉在测量领域的应用^[6-14];2)不同光源种类激光自混合干涉的研究^[15-16];3)利用各种信号处理方法提高激光自混合干涉测量精度^[17-19]。本文结合光干

收稿日期:2015-01-26;收到修改稿日期:2015-03-01;网络出版日期:2015-05-28

基金项目:国家自然科学基金(61308072)

作者简介:宦海(1978—),男,博士,副教授,主要从事光学精密仪器检测等方面的研究。E-mail: fainthaihuan@163.com

*通信联系人。E-mail: zhangyu5758@163.com

涉原理和典型的激光自混合干涉测量模型对外腔为包含多路反馈结构的激光自混合干涉进行研究,针对外腔为两路反馈结构的激光自混合干涉进行理论分析及仿真实验。外腔为两路反馈结构的激光自混合干涉类似于多重外腔激光自混合干涉,只是两路反馈外腔结构中每路反馈都会携带一个物体的运动信息,因此可以实现同时对两个待测目标进行测量。后期结合快速傅里叶变换(FFT)分析法、相位调制技术和信号分解,可以实现两路待测目标位移信息的精确测量,将理论拓展到多路反馈,有望实现速度、位移及振动的多路非接触测量,在测量领域有重要的应用前景。

2 多路反馈外腔结构的自混合干涉理论分析

建立的两路反馈外腔结构的激光自混合干涉光路图如图1所示,光路中用分束器将激光器的输出光分成两路,分别折向反射镜1和反射镜2,同时待测目标将激光经原光路反射回激光腔。 L_0 为激光器到分束器的距离, L_{01} 、 L_{02} 分别为分束器到反射镜1和到反射镜2的距离。参考激光自混合干涉典型测量模型,假设反射镜1到激光腔为外腔1,反射镜2到激光腔为外腔2。

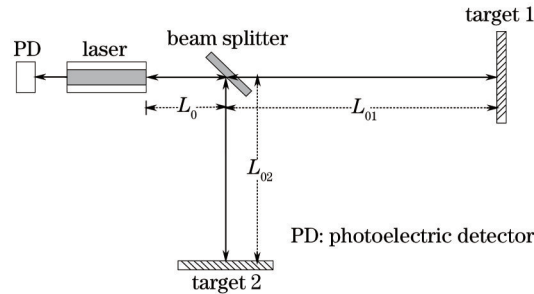


图1 两路反馈外腔结构激光自混合干涉光路图

Fig.1 Schematic diagram of laser self-mixing interference with the two feedback external cavity

因为投向反射镜1和反射镜2的激光为同一束激光经过分束器得到的,所以经反射镜1反射回激光腔的光束复振幅可记为

$$E_1(t) = E_{01} \exp[i(\omega_{01}\tau + \varphi)], \quad (1)$$

式中 E_{01} 为反射光的振幅, $\omega_{01}\tau$ 为激光经外腔1无反馈时的相位, φ 为激光从激光腔输出的初始相位。经反射镜2反射回激光腔的光束复振幅可记为

$$E_2(t) = E_{02} \exp[i(\omega_{02}\tau + \varphi)], \quad (2)$$

式中 E_{02} 为反射光的振幅, $\omega_{02}\tau$ 为激光经外腔2无反馈时的相位, φ 为激光从激光腔输出的初始相位。两束反射光在激光腔外产生干涉,干涉光合成复振幅可表示为

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t), \quad (3)$$

由光干涉理论可得干涉光强为

$$I(t) = \langle E(t)E^*(t) \rangle, \quad (4)$$

将(1)式和(2)式带入(4)式计算整理可得:

$$I(t) = E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\omega_{01}\tau - \omega_{02}\tau), \quad (5)$$

由(5)式可以看出两个外腔反射光束在激光腔外的干涉光相位为

$$\omega_0\tau = \omega_{01}\tau - \omega_{02}\tau. \quad (6)$$

由于两路反馈外腔结构的激光自混合干涉理论和典型的多重外腔激光自混合干涉理论相似,且多重外腔激光自混合干涉所得结果被证实和普通三镜腔自混合干涉结构所得结果一致^[20],所以可以借助典型的激光自混合干涉理论进行研究,其数学模型为^[6-10]

$$\omega\tau = \omega_0\tau - C \sin(\omega\tau + k), \quad (7)$$

$$I = I_0[1 + mG(\omega\tau)], \quad (8)$$

$$G(\omega\tau) = \cos(\omega\tau), \quad (9)$$

式中 $k = \arctan \alpha$, α 为激光器线宽展宽因子; $\omega_0\tau$ 为无反馈时的相位; $\omega\tau$ 为有反馈时的相位; ω 和 ω_0 分别

为激光器有反馈和无反馈时的振动频率; $\tau = 2L/c$ 为外部时间延迟; L 为外腔长度; c 为光速; C 为光反馈水平因子; I 和 I_0 分别为有反馈和无反馈时激光器的输出功率; m 为调制系数; $G(\omega)$ 为激光输出增益, 体现了外腔光相位对激光输出功率的影响。(6)式所得的两路反馈光的干涉光相位就相当于典型自混合干涉测量数学模型中无反馈时的相位, 将其带入(7)~(9)式即可得到两路反馈外腔结构的激光自混合干涉的有反馈时相位、激光器输出功率和输出增益。通过改变外腔1和外腔2的长度, 即改变 L_{01} 和 L_{02} , 可以得到 I 和 τ 之间的关系曲线。当反馈水平因子 C 和激光器线宽展宽因子 α 固定时, 根据激光自混合干涉信号 I , 可提取相位信息 ω_0 , 再进行信号分解可得到外腔1的相位信息 ω_{01} 和外腔2的相位信息 ω_{02} , 再由外部时间延迟 $\tau = 2L/c$, 即可实现外腔1和外腔2的位移测量。

3 多路反馈外腔结构的自混合干涉数值仿真

假定外腔1和外腔2都做简谐振动, 其运动规律分别为

$$L_1 = L_0 + L_{01} + \Delta L_{01} \sin(2\pi f_1 t), \quad (10)$$

$$L_2 = L_0 + L_{02} + \Delta L_{02} \sin(2\pi f_2 t), \quad (11)$$

式中 $L_0 + L_{01}$ 和 $L_0 + L_{02}$ 分别为激光输出镜到反射镜1和到反射镜2的初始距离, ΔL_{01} 和 ΔL_{02} 分别为反射镜1和反射镜2的振动幅值, f_1 和 f_2 分别为反射镜1和反射镜2的振动频率, t 为时间变量。

由 $\tau = 2L/c$ 可得:

$$\omega_{01}\tau = \frac{4\pi \times [L_0 + L_{01} + \Delta L_{01} \sin(2\pi f_1 t)]}{\lambda}, \quad (12)$$

$$\omega_{02}\tau = \frac{4\pi \times [L_0 + L_{02} + \Delta L_{02} \sin(2\pi f_2 t)]}{\lambda}, \quad (13)$$

将(12)和(13)式带入(6)式可得:

$$\omega_0\tau = \frac{4\pi \times [L_0 + L_{01} + \Delta L_{01} \sin(2\pi f_1 t)]}{\lambda} - \frac{4\pi \times [L_0 + L_{02} + \Delta L_{02} \sin(2\pi f_2 t)]}{\lambda}, \quad (14)$$

整理得:

$$\omega_0\tau = A_0 + A_1 \sin(2\pi f_1 t) - A_2 \sin(2\pi f_2 t), \quad (15)$$

式中 $A_0 = 4\pi(L_{01} - L_{02})/\lambda$, $A_1 = 4\pi\Delta L_{01}/\lambda$, $A_2 = 4\pi\Delta L_{02}/\lambda$ 。结合(7)式可得有反馈时的相位, 结合(8)和(9)式可得到多路反馈激光自混合干涉的激光器输出功率及输出增益。由(15)式可以看出输出主要由参数 A_0 、 A_1 、 A_2 决定, 所以主要研究这3个参数对两路反馈外腔结构的激光自混合干涉的影响。设线宽展宽因子 $\alpha = 5$ ^[10], 考虑到弱光反馈条件和方便观察信号的方向性, 令光反馈水平因子 $C = 0.9$, 将自定义频率参数 f_1 和 f_2 带入(7)~(9)式即可得到两路反馈外腔结构的激光自混合干涉信号。

利用 Matlab 进行仿真, 结果如图2所示。反射镜1为振幅为 $2 \mu\text{m}$ 、频率为 2 Hz 的正弦运动[见图2(a)], 反射镜2为振幅为 $1 \mu\text{m}$ 、频率为 10 Hz 的正弦运动[见图2(b)], 根据光干涉原理可以得到干涉光的相位 $\omega_0\tau$ [见图2(c)], 再根据上述推导的理论将得到的干涉光的相位带入典型激光自混合干涉数学模型, 可以得到两路反馈外腔结构激光自混合干涉信号有反馈时的相位 $\omega\tau$ [见图2(d)], 将有反馈时的相位带入上述数学模型即可得到两路反馈外腔结构激光自混合干涉信号[见图2(e)]。仿真结果表明两路反馈外腔结构的激光自混合干涉信号与正弦调制的激光自混合干涉信号相似, 只是这里的调制为两路反馈信号的相互调制, 且信号频率都较低。图3为光反馈水平因子 $C = 0.1$ 、 0.5 、 0.9 时对应的自混合干涉信号, 可以看出在弱光反馈条件下自混合干涉信号为类正弦信号, 在较强光反馈条件下自混合干涉信号为类锯齿波信号。

4 实验观察

两路反馈外腔结构激光自混合干涉实验装置如图4所示, 包括一个氦氖(He-nE)激光管(632.8 nm , TEM00)及驱动电源, 一个光电探测器(PD)(THORLABS, DET36A/M, $350 \sim 1100 \text{ nm}$), 一个分束器(50:50)和两个反射镜。反射镜1被固定在一个高分辨率的压电陶瓷(PZT)(XMT, 40VS12)上, 该PZT在控制器(XMT, XE501-D)闭环控制下极限分辨率可以达到 0.1 nm , PZT的最大运动范围为 $40 \mu\text{m}$ 。反射镜2被固定在扬声器上, 扬声器由信号发生器(RIGOL, DG1302Z)驱动。为了避免外界振动干扰, 以上所有器件均被放置在光

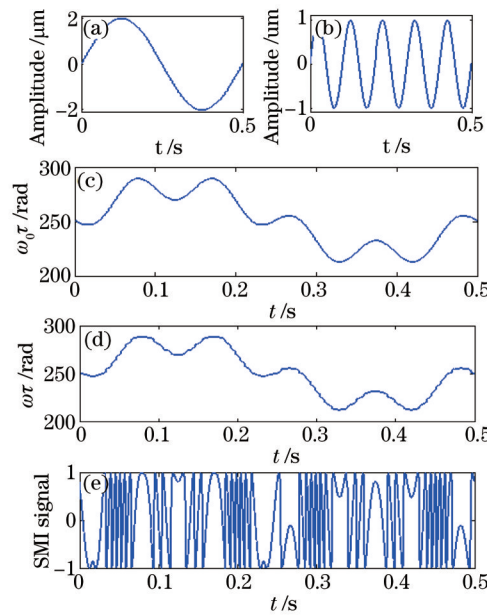


图2 两路反馈外腔结构的激光自混合干涉 Matlab 仿真图。(a) 外腔 1 振动信号; (b) 外腔 2 振动信号; (c) 无反馈时相位; (d) 有反馈时相位; (e) 两路反馈外腔结构自混合干涉信号

Fig.2 Matlab simulation diagrams of LSMI with two feedback external cavity.

(a) Vibration signal of target1; (b) vibration signal of target2; (c) phase without feedback; (d) phase with feedback; (e) SMI signal of the two feedback external cavity

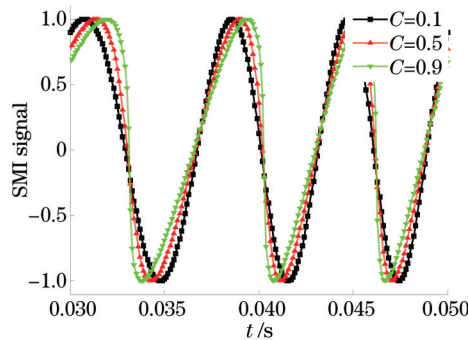


图3 不同光反馈水平因子对应自混合干涉信号

Fig.3 SMI signals under the conditions of different feedback strength parameters

学隔振平台上。He-Ne 激光管的前腔面、分束器、反射镜 1、反射镜 2 构成两路反馈外腔结构激光自混合干涉结构。

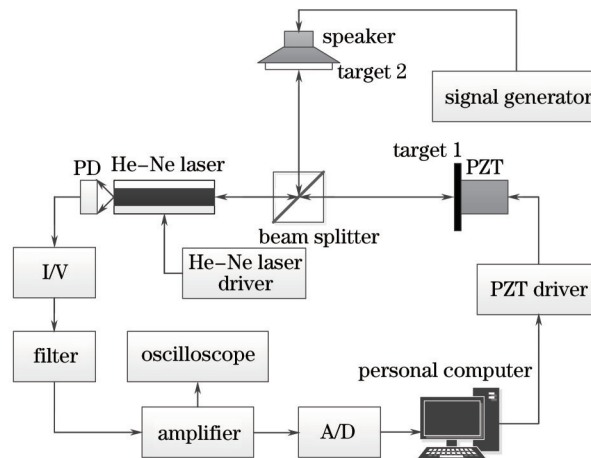


图4 实验装置示意图

Fig.4 Diagram of experimental setup

He-Ne激光器发射的光束经过分束器被分成两束光,分别照射在反射镜1和反射镜2上,经反射部分光沿原路反馈回激光腔。PZT和扬声器的振动分别引起反射镜1和反射镜2对应的外腔相位的波动,由于PZT和扬声器由不同的驱动器驱动,因此它们的运动是独立的,对应外腔的相位波动也是独立的。两个独立的外腔相位波动形成了两路反馈,从而使激光器的输出强度发生波动,波动的光强同时携带了PZT和扬声器的振动信息。由PD探测激光器的输出,所得电流经过电流/电压(I/V)转换电路、滤波电路、放大电路和模/数(A/D)转换器由数据采集卡(National Instrument, USB-6212)采集并传输到电脑,在电脑端由Labview进行信号获取和处理,同时使用示波器(Tektronix, TDS2024)进行辅助观察调节系统。所得两路反馈外腔结构激光自混合干涉信号如图5所示。

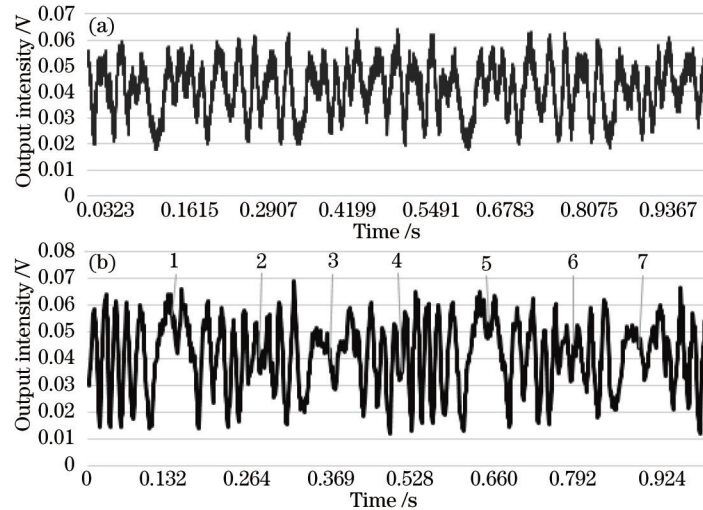


图5 两组两路反馈外腔结构激光自混合干涉实验结果

Fig.5 Two sets of experimental results of LSMI with two feedback external cavity

在反射镜1做幅值为 $2\ \mu\text{m}$ 、频率为 $2\ \text{Hz}$ 的正弦运动,反射镜2做频率为 $4\ \text{Hz}$ 的正弦运动(由于扬声器由信号发生器驱动,故不能准确给出运动幅值)的条件下,两次通过Labview观察到两路反馈自混合干涉信号,如图5所示。由于实验中没有对PZT和扬声器采取锁相处理,因此PZT和扬声器的驱动是独立的,每次反射镜1和反射镜2运动的起始相位都不同,所以图5(a)和(b)存在一定的差异。从图5(b)中可以清晰地看到1、3、5、7处为外腔相位变化的4个拐点,这与反射镜1做频率为 $2\ \text{Hz}$ 的正弦运动相符合;2、4、6处为外腔相位变化较快的3个拐点,所以从采集到的图像上可以看到7个拐点,从条纹规律上看还有一个拐点应该是位于采集起始位置或者结束位置,这与反射镜2做 $4\ \text{Hz}$ 的正弦运动相符合。忽略反射镜1和反射镜2起始相位的随机性,实验结果和仿真结果相吻合。

另外实验中有较强的干扰,这些干扰的来源有以下几个方面:扬声器本身品质不高,振动中会携带很多噪声;扬声器和PZT没有采取锁相处理,实验中各自位相的偏移会给实验带来干扰;外部光噪声也会对实验结果带来一定影响;实验电路中也会有不可避免的干扰。针对位相偏移干扰,对扬声器和PZT驱动信号进行锁相处理是必要的,在今后的两路反馈外腔结构激光自混合干涉信号处理中会对此进行实验改进以获得更精确的实验数据。

5 结 论

对两路反馈外腔结构自混合干涉模型进行分析,从理论上证实了在弱光反馈条件下,两路反馈外腔结构自混合干涉系统的输出为周期性变化的干涉条纹,且一个周期内的条纹疏密度由两个外腔的振动频率和初始相位决定;干涉信号在外部光反馈强度较小条件下为类正弦波,在外部光反馈强度较大条件下为类锯齿波。对理论所得结果进行数值仿真分析,并设计实验系统验证该结论。如果忽略两路反馈的外腔结构,理论所得结果与外腔做特殊的正弦运动条件下的典型激光自混合干涉所得结果类似。

参 考 文 献

- 1 Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of

- Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- 2 Wang W M, Grattan K T V, Palmer A W, *et al.*. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(9): 1577-1587.
 - 3 Bosch T, Donati S. Optical feedback interferometry for sensing application[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 20-27.
 - 4 Yu Yanguang, Yao Jianquan, Ye Huiying. A self-mixing interference structure with pre-feedback used for measuring displacement[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(3): 308-312.
禹延光, 姚建铨, 叶会英. 含预反馈的激光自混合干涉型位移测量结构[J]. 光学学报, 2002, 22(3): 308-312.
 - 5 Guo D. Quadrature demodulation technique for self-mixing interferometry displacement sensor[J]. Optics Communications, 2011, 284(24): 5766-5769.
 - 6 Gouaux F, Servagent N, Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer[J]. Applied Optics, 1998, 37(28): 6684-6689.
 - 7 Yu Yanguang, Guo Changying, Ye Huiying. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1430-1434.
禹延光, 郭常盈, 叶会英. 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1430-1434.
 - 8 Giuliani G, Norgia M, Donati S, *et al.*. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, 4(6): S283-S294.
 - 9 Scalise L, Yu Y, Giuliani G, *et al.*. Self-mixing laser diode velocimetry: application to vibration and velocity measurement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(1): 223-232.
 - 10 Yu Y, Giuliani G, Donati S. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self-mixing effect[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(4): 990-992.
 - 11 Liu Qiang, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0612011.
刘 强, 王 鸣, 夏 巍, 等. 正弦相位调制型激光自混合干涉仪的实时位移测量技术[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0612011.
 - 12 Van H B, Bosman E, Missinne J, *et al.*. Photonic incremental pressure sensor based on optical feedback in a polymer embedded VCSEL[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(13): 1151-1153.
 - 13 Yang Ying, Li Xingfei, Li Hongyu, *et al.*. Acceleration sensor based on self-mixing interference[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228003.
杨 颖, 李醒飞, 李洪宇, 等. 基于激光自混合效应的加速度传感器[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228003.
 - 14 Huang Yue, Wang Qiang, Yang Qihua, *et al.*. Experimental analysis of distributed fiber optic underwater natural gas pipeline leakage detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 110602.
黄 悦, 王 强, 杨其华, 等. 水下天然气管道分布式光纤泄漏检测系统实验分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 110602.
 - 15 Lu H, Wang M, Dai X, *et al.*. All-fiber self-mixing interferometer based on DFB laser and phase modulating technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(4): 221-223.
 - 16 Hao Hui, Xia Wei, Wang Ming, *et al.*. Self-mixing interference effect based on fiber laser[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(23): 234202.
郝 辉, 夏 巍, 王 鸣, 等. 光纤激光器自混合干涉效应研究[J]. 物理学报, 2014, 63(23): 234202
 - 17 Guo Dongmei, Tan Suqing, Wang Ming. Analysis of micro-displacement measurement accuracy in self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 845-850.
郭冬梅, 谈苏庆, 王 鸣. 正弦相位调制自混合干涉微位移测量精度分析[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 845-850.
 - 18 Xia Wei, Hao Hui, Wang Feng, *et al.*. Analysis and test for the dynamic performance of laser self-mixing interferometer based on phase modulation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 38(12): 1208003.
夏 巍, 郝 辉, 王 峰, 等. 相位调制型激光自混合干涉仪的动态特性分析及测试[J]. 中国激光, 2012, 38(12): 1208003.
 - 19 Yang Zhengyu, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Testing and analysis of Large-Range displacement measurement precision in sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412007.
杨振宇, 王 鸣, 夏 巍, 等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412007.
 - 20 Huan Hai, Wang Ming, Hao Hui, *et al.*. Theory and experiment study on self-mixing interference with multiple external reflectors[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(11): 1373-1377.
宦 海, 王 鸣, 郝 辉, 等. 多外腔自混合干涉现象的理论与实验[J]. 中国激光, 2005, 31(11): 1373-1377.