

文章编号: 0253-2239(2007)08-1430-5

# 基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量<sup>\*</sup>

禹延光 郭常盈 叶会英

(郑州大学信息工程学院, 郑州 450052)

**摘要:** 光反馈自混合干涉技术是一种新浮现的有别于传统双光束干涉的一类新的测试技术。为了在适度光反馈下进行振动的精密测量,提出了一种基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量方法。经对光反馈自混合干涉信号条纹分析,发现通过选定合适的光反馈水平及激光器线宽展宽因数,可以得到锯齿干涉条纹。这种干涉信号不仅包含振动幅度信息也包含振动方向信息。该振动测量方法利用锯齿干涉条纹的特点,首先通过条纹记数实现大范围振幅粗测,具有半波长位移分辨力;然后基于适度光反馈下小数条纹的特点,给出了小于半波长位移测量的线性表达式,从而实现位移的精测。仿真计算表明,该方法可以实现大量程高分辨力振动位移测量,在叠加 20 dB 的噪声下,振幅测量相对误差平均为 0.5%。

**关键词:** 振动测量; 半导体激光传感器; 光反馈自混合干涉; 小数干涉条纹

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

## Vibration Measurement Based on Moderate Optical Feedback Self-Mixing Interference

Yu Yanguang Guo Changying Ye Huiying

(School of Informing Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052)

**Abstract:** Optical feedback self-mixing interferometry is an emerging sensing and measurement technique, which is quite different with traditional double-beam interferometry. To perform precision vibration measurement under the condition of moderate optical feedback, a vibration measurement method is proposed based on moderate optical feedback self-mixing interference. Based on the analysis of the optical feedback self-mixing interference signal fringes, it is found that saw-like fringes in the self-mixing signal waveforms can be observed by properly choosing the optical feedback level and line width enhancement factor of semiconductor laser. With the saw-like fringe not only the vibration amplitude can be measured, but the movement direction can also be determined. The proposed measurement is based on the analysis of saw-like fringes with the following two steps. Firstly, rough measurement of displacement is carried out by counting the fringe numbers with the resolution of half wavelength. Then based on the studies of fractional fringe structure under modulate optical feedback, a linear formula for displacement within half wavelength is derived, and precise displacement measurement is realized. Computer simulations show that the proposed technology is able to achieve high-resolution and large-range measurement of vibration amplitude.

**Key words:** vibration measurement; semiconductor laser sensor; optical feedback self-mixing interference; fractional fringe

### 1 引言

光反馈自混合干涉(Optical feedback self-mixing interference, OFSMI)是指激光器输出光被外部反射体反射或散射后,其中一部分光又反馈回激光器谐

振腔,反馈光与腔内光相混合,从而调制激光器的输出光。弱光反馈下,被调制的激光输出信号类似于传统的双光束干涉信号,而在适度光反馈下,激光输出信号为类锯齿波形,统称这类信号为光反馈自混

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60574098)资助课题。

作者简介: 禹延光(1964—),女,郑州人,博士,教授,主要从事新型传感理论与技术、数字信号处理等方面的研究。

E-mail: yanguangyu@zzu.edu.cn

收稿日期: 2006-11-03; 收到修改稿日期: 2007-01-15

合干涉信号。由于光反馈自混合干涉信号携带了外部反射(散射)体和激光器自身参量的信息,可用于位移、距离、速度、形貌及激光器自身参量等的测量<sup>[1~13]</sup>。

基于光反馈自混合干涉技术的位移测量通常采用条纹记数法<sup>[14,15]</sup>和相位测量法<sup>[16~18]</sup>。条纹记数法量程大、信号处理简单、易于实现,但分辨力限于半个光波波长,改进措施是进行条纹细分,但由于光反馈自混合干涉信号不是正弦波形,传统的条纹细分技术不适用。相位测量法可实现很高的测量分辨力,但测量范围仅限于一个波长内,改进措施有合成波长法<sup>[15]</sup>等,但量程不能得到很大的改善。

近年来,光反馈自混合干涉效应的研究及其应用技术的发展,使得适度光反馈下位移测量具有独特的特点:干涉条纹为类锯齿波,锯齿方向包含了矢量位移信息,使得光学测量系统可免去方向辨识器件。理论和实验研究已表明,类锯齿条纹的形状由反馈水平及激光器线宽展宽因数决定<sup>[9]</sup>。本文利用条纹法的大量程特点,结合小数条纹分析,实现大量程高分辨力矢量位移测量。所基于的思想是通过选定合适的光反馈水平及激光器线宽展宽因数,得到较纯正的锯齿干涉条纹,对这种干涉信号进行微分产生相应的正负脉冲,经脉冲记数法获得位移的粗略,然后将整数部分置零,保留小数条纹部分进行分析,研究半波长范围内位移的改变对小数条纹波形的影响,从而找出有关的对应关系,进行小数位移的精测,以实现大量程高分辨力位移测量。

## 2 基础理论

### 2.1 理论模型

对光反馈自混合干涉的理论研究,已经给出了普遍接受的测量模型<sup>[5~14]</sup>,

$$\phi_F(\tau) = \phi_0(\tau) - C \sin[\phi_F(\tau) + k], \quad (1)$$

$$P[\phi_F(\tau)] = P_0 \{1 + mG[\phi_F(\tau)]\}, \quad (2)$$

$$G[\phi_F(\tau)] = \cos[\phi_F(\tau)], \quad (3)$$

式中  $k = \arctan \alpha$ ,  $\alpha$  为半导体激光器线宽展宽因数,  $\phi_0$  为无反馈时的相位,  $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau$ ,  $\phi_F$  为有反馈时的相位,  $\phi_F(\tau) = \omega_F \tau$ , 其中  $\omega_F(\tau)$ ,  $\omega_0(\tau)$  分别为有、无反馈时激光的角频率;  $\tau = 2L/c$ ,  $L$  为外腔长度,  $c$  为光速;  $C$  为光反馈水平因子;  $P[\phi_F(\tau)]$  和  $P_0$  分别为有外腔和无外腔时半导体激光器的输出功率,  $m$  为调制系数(典型值为  $m \approx 10^{-3}$ );  $G[\phi_F(\tau)]$  为干涉函数核,它体现了外腔光相位对激光输出功率的影响。

通过改变外腔长度  $L$ ,可以得到  $P[\phi_F(\tau)]$  和  $\tau$  之间的关系曲线。当  $C$  和  $\alpha$  已知时,根据光反馈自混合干涉信号即  $P[\phi_F(\tau)]$ ,可提取相位信号  $\phi_0(\tau)$ ,并由  $\tau = 2L/c$  实现  $L$  的测量,即外腔位移的测量。

### 2.2 理论波形

假定外腔(外部物体)做简谐振动,运动规律为

$$L = L_0 + \Delta L \sin(2\pi ft), \quad (4)$$

式中  $L_0$  为激光输出镜和外部物体之间的初始距离,  $\Delta L$  为外腔简谐振动的幅值,  $f$  为外腔的振动频率,  $t$  为时间变量。由  $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau = \omega_0 \cdot 2L/c = 4\pi L/\lambda_0$ , 可得

$$\phi_0(\tau) = A_0 + \Delta A \sin(2\pi ft), \quad (5)$$

式中  $A_0 = 4\pi L_0/\lambda_0$  为外腔的初始相位,  $\Delta A = 4\pi \Delta L/\lambda_0$  为外腔相位振幅。为了描述方便,将研究  $A_0$ 、 $\Delta A$  对光反馈自混合干涉理论波形的影响。当参量  $\alpha = 5$ ,  $C = 1.6$ ,  $A_0 = 8\pi$ ,  $\Delta A = 4\pi$ ,  $f = 195$  Hz 时,由(1)式、(2)式可得到光反馈自混合干涉信号如图 1 所示。

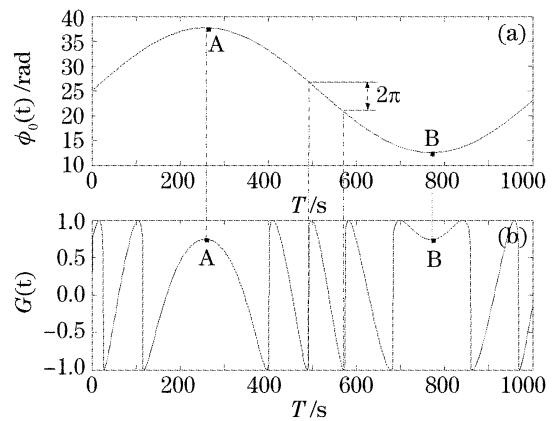


图 1 外腔正弦振动信号(a)及其对应的光反馈自混合干涉信号(b)

Fig. 1 Vibration signal of the external cavity (a) and its optical feedback self-mixing interference signal

图 1 中 A、B 对应外腔振动方向的转折点,也就是光反馈自混合干涉信号波形倾斜方向发生改变所对应的时刻,称为波形转折点。光反馈自混合干涉的基本规律是,当  $\phi_0(\tau)$  有  $2\pi$  相位的变化时(即外腔移动半个光波波长  $\lambda_0/2$ ),则  $G(\tau)$  产生一个周期波动的信号,称为一个整数条纹;而  $\phi_0(\tau)$  小于  $2\pi$  相位的变化,所产生的  $G(\tau)$  变化量,称为小数条纹。波形转折点之间整数干涉条纹数目对应外腔振动的粗略幅值。因此把  $\Delta L$  分为两部分,记做

$$\Delta L = (\Delta L_1/2 + \Delta L_D), \quad (6)$$

式中  $\Delta L_1$  为信号波形转折点之间整数干涉条纹所对应的部分,即  $\Delta L_1 = N\lambda_0/2$ ,  $N$  为转折点之间整数条

纹的个数;  $\Delta L_D$  为小数条纹所对应的部分,  $\Delta L_D < \lambda_0/2$ 。

将(6)式代入(5)式可得

$$\phi_0(\tau) = A_0 + (A_I/2 + A_D)\sin(2\pi f\tau), \quad (7)$$

式中  $A_I = 2N\pi$ ,  $A_D = 4\pi\Delta L_D/\lambda_0$ ,  $0 < A_D < 2\pi$ 。为测量方便, 可以进行系统预调整, 满足  $A_0 = 2k\pi$ , 则光反馈自混合干涉信号波形只由参量  $\alpha$ 、 $C$ 、 $f$ 、 $A_I$ 、 $A_D$  来决定。

### 3 测量方法

#### 3.1 随转折点的变化关系

在图 1 中, A 或 B 为光反馈自混合干涉信号转折点,  $G(t_A)$  或  $G(t_B)$  为此时刻 A 或 B 点的光反馈自混合干涉信号值。利用光反馈自混合干涉理论模型, 可分析  $G(t_A)$  与  $A_D$  的关系。相应于转折点 A 或 B, 由(7)式得

$$\phi_0(t_A) = A_0 \pm (A_I/2 + A_D), \quad (8)$$

在考虑小数条纹,  $\phi_0(\tau) < 2\pi$  时, (8)式可简化为

$$\phi_0(t_A) = \pm A_D, \quad (9)$$

利用(1)式, (2)式和(9)式, 可以得到  $G(t_A)$  随  $A_D$  的变化规律如图 2 所示。

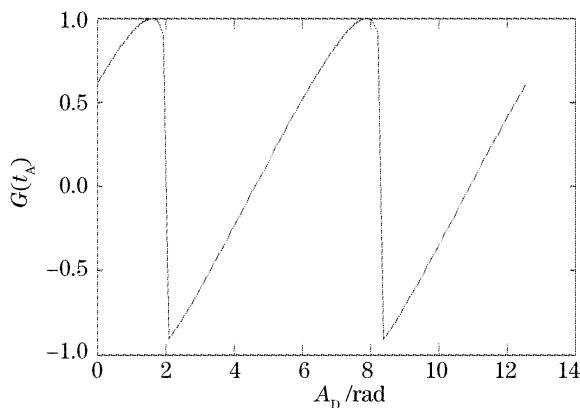


图 2  $G(t_A)$  随  $A_D$  的变化曲线

Fig. 2 Curve of  $G(t_A)$  versus  $A_D$

仿真研究表明:

1)  $\alpha$  和  $C$  决定变化规律的形状。当  $C > 1$  时,  $G(t_A)$  为类锯齿波, 即变化规律可近似看作直线上上升段和下降段两部分。

2) 选取合适的参量, 可增加上升段而减小下降段, 即获得锯齿波形(如  $\alpha=5$ ,  $C=2$ )。因此, 可以通过选择合适的激光管, 调整测量系统达到适度的光反馈量, 获得锯齿波形的光反馈自混合干涉信号。然后对锯齿段进行最小二乘线性拟合, 找出  $G(t_A)$  与  $A_D$  的近似线性表达式, 也就是小数条纹的测量表达式。

#### 3.2 锯齿段的最小二乘线性拟合

利用(1)式, (2)式, (9)式, 并假定  $\alpha=5$ ,  $C=1.6$ ,  $f=195$  Hz, 建立观测数据组  $[A_{Di}, G(t_{Ai})]$ , 令线性拟合式为

$$F(A_D) = c_1 + c_2 A_D, \quad (10)$$

式中  $c_1, c_2$  为自定义变量系数。由最小二乘拟合法来确定系数  $c_1$  和  $c_2$ :

$$\begin{cases} c_1 + c_2 A_{D1} - G_1(A) = \delta_1, \\ c_1 + c_2 A_{D2} - G_2(A) = \delta_2, \\ c_1 + c_2 A_{D3} - G_3(A) = \delta_3, \\ \dots\dots \\ c_1 + c_2 A_{Dn} - G_n(A) = \delta_n, \end{cases} \quad (11)$$

当  $\sum_{i=1}^n (\delta_i)^2 = \Delta_{\min}$ , 则

$$\frac{\partial}{\partial c_k} \left[ \sum_{i=1}^n (\delta_i)^2 \right] = 0, \quad (12)$$

即

$$\sum_{i=1}^n \delta_i \frac{\partial \delta_i}{\partial c_k} = 0, \quad (k=1, 2) \quad (13)$$

于是位移小数条纹的测量表达式为

$$F(A_D) = -1.075 + 0.39A_D. \quad (14)$$

当由实验的光反馈自混合干涉信号测得  $G(t_A)$  和  $G(t_B)$  时, 把它们分别代替  $F(A_D)$ , 由(14)式可计算出相应的小数位移, 分别记做  $A_D$  和  $B_D$ 。结合传统的条纹记数法, 获得  $A_I$ , 则所测量的振动幅值为

$$\Delta L = \frac{\Delta A \lambda_0}{4\pi} = \frac{(A_I + A_{DA} + A_{DB})\lambda_0}{8\pi}. \quad (15)$$

#### 3.3 测量方法总结

1) 对于一个光反馈自混合干涉实验信号, 首先利用文献[9]可测得  $C, \alpha$  的估计值。

2) 由光反馈自混合干涉理论模型中的(1)式, (2)式和(9)式, 及第一步所获得的  $\alpha, C$  的值, 建立观测数据组  $[A_{Di}, G(t_{Ai})]$ , 利用最小二乘法获得测量式  $F(A_D)$ 。

3) 对光反馈自混合干涉信号的实验数据进行微分处理, 获得脉冲信号, 经过正(负)脉冲记数获得整数条纹数目  $N$ , 以确定  $A_I = 2N\pi$ 。

4) 测量波形转折点 A 和 B 处的信号幅值, 即为  $F(A_D)$ , 由(14)式确定  $A_D$  和  $B_D$ 。

5) 计算振动位移  $\Delta L = (A_I + A_D + B_D)\lambda_0/8\pi$ 。

显然, 该方法有条纹法测量范围大的优势, 又具有小条纹的精细测量, 因此实现了大量程高分辨力位移测量。

## 4 性能仿真

为了验证该方法的有效性,进行了仿真计算。假定  $C=1.6$ ,  $\alpha=5$ , 则可利用(14)式作为小数条纹测量式。

假定所测量的 4 个振动信号为

$$\phi_{01}(\tau) = \omega_0 \tau = 80000\pi + 42.704\sin(60\pi t),$$

$$\phi_{02}(\tau) = \omega_0 \tau = 60000\pi + 22.608\sin(60\pi t),$$

$$\phi_{03}(\tau) = \omega_0 \tau = 40000\pi + 33.598\sin(60\pi t),$$

$$\phi_{04}(\tau) = \omega_0 \tau = 20000\pi + 26.376\sin(60\pi t),$$

利用(1)式和(3)式获得光反馈自混合干涉信号样本  $G_i(t_i)$ 。为了仿真实际情况,在  $G_i(t_i)$  中加入信噪比为 20 dB 的白噪声。图 3 为四组振动信号及其相

应的光反馈自混合干涉信号。

以图 3 振动信号  $\phi_{01}(t)$  为例,测得  $G_1(t_A) \approx 0.85$ ,  $G_1(t_B) \approx -0.28$ , 由(14)式可得到  $A_D=4.930$ ,  $B_D=4.867$ 。由于一个振动周期中整数条纹  $N=12$ , 可以确定  $A_{11}=24\pi$ 。如果取半导体激光器的中心波长  $\lambda_0$  为 780 nm, 则振动幅度  $\Delta L = (A_1 + A_{DA} + A_{DB})\lambda_0/8\pi = 2619.023$  nm。而所施加的振动信号 1 的真实值是 2652 nm, 显然测量结果是可靠的。

表 1 是 4 个振动信号的测量结果。显然,在叠加 20 dB 的噪声下,对于 3  $\mu\text{m}$  以下的振动,测量相对误差平均为 0.5%。由于该算法的误差来源在于小数条纹的线性化以及叠加的噪声,因此对大振幅测量将会得到更小的测量误差。

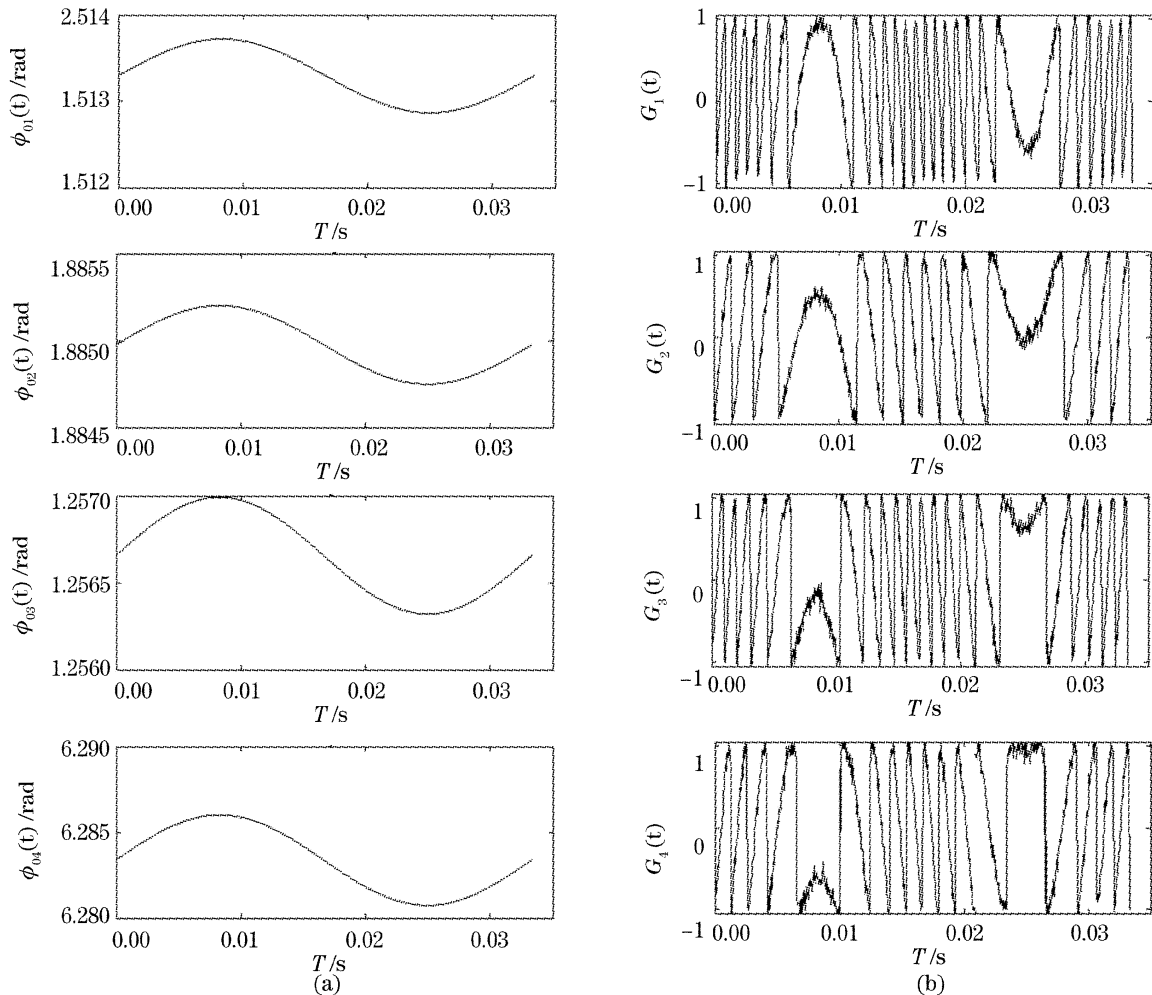


图 3 不同的振动曲线(a)及其对应的光反馈自混合干涉信号(b)

Fig. 3 Different vibration signals of the external cavity (a) and their optical feedback self-mixing interference signals (b)

表 1 振幅测量结果

Table 1 Measured results of vibration amplitude

Optical feedback self-mixing interference signals	Signal 1	Signal 2	Signal 3	Signal 4
Actual amplitude $\Delta L$ / nm	2652	1404	2086.5	1638
Measured amplitude $\Delta L$ / nm	2644.2	1397.2	2074.8	1628.3
$(\delta_{\Delta L}/\Delta L)$ / %	0.29	0.48	0.56	0.59

## 5 结 论

提出了一种基于适度光反馈自混合干涉技术的振动测量方法,通过选择合适的激光管如 HL7851G,调整测量系统达到适度的光反馈量,使得系统参量靠近  $\alpha=5, C=2$ ,以便获得具有较纯正锯齿波形的光反馈自混合干涉信号。该信号的微分脉冲经计数测量可以实现振动的粗测。小数条纹分析给出了小数位移的精测表达式。仿真计算表明,所提出的方法可以实现大量程高分辨力位移测量,在叠加 20 dB 的噪声下,对于几微米的振动,振幅测量相对误差平均为 0.5%。而对于更大的振动测量,测量相对误差更小。

## 参 考 文 献

- 1 W. M. Wang, W J. O. Boyle, K. T. V Grattan *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser; experimental observations and theoretical analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(9): 1551~1559
- 2 T. Bosch, N. Servagent, S. Donati *et al.*. Optical feedback interferometry for sensing applications[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(1): 20~27
- 3 Lorenzo Scalise, Yanguang Yu, Guido Giuliani *et al.*. Self-mixing laser diode velocimetry; application to vibration and velocity measurement [J]. *IEEE Trans. Instrum. and Measure.*, 2004, **53**(1): 223~232
- 4 W. M. Wang, K. T. V. Grattan, A. W. Palmer *et al.*. Self-mixing interference inside a single mode diode laser for optical sensing applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(9): 1577~1587
- 5 P. J. de Groot, G. M. Gallatin, S. H. Macomber. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 4475~4480
- 6 Yu Yanguang, Ye Huiying, Yao Jianquan. Steady solution to the self-mixing interference system for measuring displacement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 80~84 (in Chinese)  
禹延光,叶会英,姚建铨. 激光自混合干涉位移测量系统的稳态解[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 80~84
- 7 Yu Yanguang, Yao Jianquan, Ye Huiying. A self-mixing interference structures including the pre-feedback used for measuring displacement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 308~312 (in Chinese)  
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
- 8 Yu Yanguang, Cheng Ming, Qiang Xifu. Self-mixing interference effects in a multi-mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9): 1093~1098 (in Chinese)  
禹延光,程明,强锡富. 多重光反馈的激光的自混合干涉[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9): 1093~1098
- 9 Yu Yanguang, Qiang Xifu, Wei Zhenlu *et al.*. A differential displacement system using laser self-mixing interference effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1269~1273 (in Chinese)  
禹延光,强锡富,魏振禄等. 差动型激光自混合干涉式位移测量系统[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1269~1273
- 10 P. A. Roos, M. Stephens, C. E. Wieman. Laser vibrometer based on optical-feedback-induced frequency modulation of a single-mode laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34): 6754~6761
- 11 S. K. Özdemir, S. Shinohara, S. Ito *et al.*. Compact optical instrument for surface classification using self-mixing interference in a laser diode[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(1): 38~43
- 12 Yanguang Yu, Guido Giuliani, Silvano Donati. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self-mixing effect [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 990~992
- 13 Jiangtao Xi, Yanguang Yu, Joe F. Chicharo *et al.*. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2005, **41**(8): 1058~1064
- 14 S. Donati, G. Giuliani, S. Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(1): 113~119
- 15 T. Yoshino, M. Nara, S. Mnatzakanian *et al.*. Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(5): 892~897
- 16 N. Takahashi, S. Kakuma, R. Ohba *et al.*. Active heterodyne interferometric displacement measurement using optical feedback effects of laser diode[J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(3): 802~806
- 17 T. Suzuki, S. Hirabayashi, O. Sasaki *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(3): 543~548
- 18 W. M. Wang, K. T. V. Grattan, W. J. O Boyle *et al.*. Active optical feedback in a dual-diode laser configuration applied to displacement measurements with a wide dynamic range [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 1795~1801