

文章编号: 0258-7025(2002)12-1122-05

# 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用

王 鸣<sup>1</sup>, 聂守平<sup>1</sup>, 李达成<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 南京师范大学物理科学与技术学院光电技术江苏省重点实验室, 江苏 南京 210097  
<sup>2</sup> 清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084

**摘要** 分析和讨论了激光反馈干涉现象, 根据半导体激光器的反馈干涉理论, 研究了反馈干涉模型及其信号的调制和解调方法, 介绍了典型的传感应用。理论和实验表明, 激光反馈干涉的理论不同于传统干涉, 信号处理方法也有其特点。半导体激光器的光学反馈干涉系统具有结构简单、光路易准直、无需附加器件的特点, 因而能够发展成小型、在线测量和过程控制的传感器, 测量距离、位移和速度, 在微机械、光学工程等领域具有应用前景。

**关键词** 光学反馈干涉, 半导体激光器, 传感应用

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

## Optical Feedback Interferometry of Semiconductor Laser for Sensing Application

WANG Ming<sup>1</sup>, NIE Shouping<sup>1</sup>, LI Dacheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210097  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments,  
Tsinghua University, Beijing 100084

**Abstract** In this paper, the laser feedback interference phenomenon is analyzed and discussed. The basic interference theory and signal processing technique are studied; some typical sensing applications are introduced. Laser feedback interference is different from other conventional interference. The optical feedback interference of semiconductor laser has many advantages in that optical system is much simple and is easily aligned; additional optical elements are not required. A compact sensor was constructed for the online measurement of the distance, displacement and velocity. It is a promising technique used in microelectromechanical systems (MEMS), optical engineering and other engineering application.

**Key words** optical feedback interferometry, semiconductor laser, sensing application

## 1 引 言

“激光反馈效应”即“激光自混合”是将入射在外反射表面的光部分返回, 并耦合到内激光腔。重新注入的激光与激光腔内的光混合, 引起输出功率变化和频率变化, 形成外光学反馈效应。半导体激光器(LD)的光学反馈效应会产生跳模, 频率不稳定或者混沌, 增加噪声, 加宽谱线, 一直认为是严重影响激光光谱性质的干扰源<sup>[1~4]</sup>。因此, 光学反馈降低

了光通信和光存储系统的性能。自 20 世纪 80 年代以来, 激光器的光学反馈效应开始得到应用。激光反馈干涉, 即“激光自混合干涉”是反馈效应产生的干涉。在激光反馈干涉信号中, 位相和振幅的变化与外腔的光程及外反射表面有关, 这个性质被用于各种传感应用, 如测量速度<sup>[5]</sup>、长度<sup>[6]</sup>、位移或振动<sup>[7]</sup>。

由于半导体激光器具有体积小、重量轻、结构简单、光波长可调的特点, 能调节驱动电流, 实现频率调制和动态干涉, 在光纤通信、光学数据存储和光学

收稿日期: 2001-09-10; 收到修改稿日期: 2001-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50065002)和江苏省自然科学基金(No. BK2001109)资助项目。

作者简介: 王鸣(1950—), 男, 南京师范大学物理科学与技术学院教授, 博士, 主要从事光电子技术和激光应用研究。E-mail: mwang@email.njnu.edu.cn

传感应用上有潜在的实用价值。激光反馈干涉可以在半导体激光器的内激光腔实现。通过外腔长度和反馈强度的变化调制输出光的光谱特性和光强, 封装在 LD 管壳内另一侧的光电二极管探测反馈干涉信号, 检测光学反馈造成的强度和位相变化, 可以确定物体的状态。

## 2 激光反馈干涉理论

半导体激光器的光学反馈效应的理论分析有两种方法<sup>[8-10]</sup>。一是求解 Lang 和 Kobayashi 建立的速率方程的稳态解, 得出发射的频率和光强的表达式。二是采用物理模型——法-珀腔模型分析。为简单明了, 采用第二种方法分析, 其原理见图 1。系统由激光器的两个端面和被测靶面构成了两个法珀腔, 见图 1(a)。半导体激光器发射的光在外腔中传播到靶面, 一部分输出光被反射、返回并耦合到激光腔, 和激光腔内的光形成激光反馈干涉, 结果使发射光的振幅和频率受到调制。图中的  $r_1$  和  $r_2$  为 LD 两端面的振幅反射率,  $r_3$  为被测靶面的振幅反射率。 $D$  为内激光腔的长度,  $L$  为外腔的长度。激光反馈干涉的理论分析可以用它的等效腔(图 1(b))来表述。

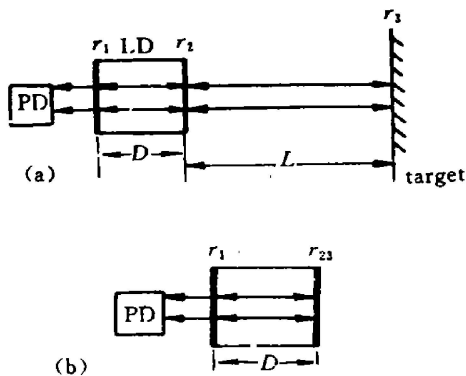


图 1 光反馈效应的示意图

(a) 激光二极管与靶面构成的外腔; (b) 等效腔

Fig. 1 Schematic diagram of the optical feedback effect

(a) a laser diode with an external cavity; (b) equivalent model

无光学反馈时, 分析激光腔的激光振荡。假定激光腔左端面上的光波的复振幅为  $E_0$ , 经右端面返回后的光波的复振幅  $E$  为

$$E = E_0 r_2 \exp(in_c k_0 D) \quad (1)$$

维持激光振荡的条件使返回后的光波的振幅  $E = E_0$

$$r_2 \exp(i2n_{c0} k_0 D) = 1 \quad (2)$$

式中  $n_{c0}$  为激光腔介质的复折射率,  $n_{c0} = n_0 - ig_0$ 。实部  $n_0$  表示光传播位相滞后因子, 虚部  $g_0$  表示腔损耗和受激辐射增益。 $k_0$  表示波矢量。下标 0 对应无光学反馈条件。

存在光学反馈时, 分析等效腔的激光振荡。在弱反馈的条件下,  $r_3 \ll r_2$ , 可以忽略在外腔中的多重反射, 等价腔右端面的有效振幅反射率表示为

$$r_{23} = r_2 + (1 - |r_2|^2) r_3 \exp(-i\Phi) = r_2 [1 + \xi \exp(-i\Phi)] \quad (3)$$

$\Phi$  为复振幅的位相,  $\Phi = 2\pi\nu\tau$ ,  $\tau = 2L/c$ ,  $\nu$  为在光学反馈条件下输出光的频率,  $\xi$  表示激光由外腔返回到激光腔的耦合系数,  $\xi = \frac{r_3}{r_2}(1 - |r_2|^2)$ 。

对应的维持激光振荡的条件

$$r_2^2 [1 + \xi \exp(-i\Phi)] \exp(i2n_c k D) = 1 \quad (4)$$

式中等价腔介质的复折射率  $n_c = n - ig$ , 对应有光学反馈条件。

复折射率的变化由腔内载流子密度变化  $\Delta N$  引起。设无光学反馈时的载流子密度为  $N_0$ , 复折射率的实部和虚部是  $n_0 = n(N_0)$  和  $g_0 = g(N)$ 。复折射率与腔内载流子密度变化有确定的关系

$$\begin{aligned} n(N_0 + \Delta N) &= n_0 + \left. \frac{dn}{dN} \right|_0 \Delta N = n_0 + \alpha \Delta N \\ g(N_0 + \Delta N) &= g_0 + \left. \frac{dg}{dN} \right|_0 \Delta N = g_0 + \rho \Delta N \end{aligned} \quad (5)$$

联立求解方程 (2), (4) 和 (5), 得到激光反馈干涉的基本理论解

$$\nu_0 - \nu = \frac{C}{2\pi\tau_L} \sin(2\pi\nu\tau_L + \arctan \alpha) \quad (6)$$

$$P = P_0 (1 + m \cos \Phi) = P_0 [1 + m \cos(2\pi\nu\tau_L)] = P_0 \left| 1 + m \cos \left[ 4\pi \frac{\nu}{c} L \right] \right| \quad (7)$$

其中,  $P$  为输出强度,  $P_0$  和  $\nu_0$  为没有光学反馈的光强和光学频率,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $m$  为纹波系数。反馈强度参数  $C$  定义为

$$C = \frac{t_L}{t_D} \xi \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (8)$$

$t_L$  和  $t_D$  是在外腔和激光腔中的飞行时间。

由 (6) 和 (7) 式可见, 激光振荡频率  $\nu$  随外腔长度非线性变化, 输出强度  $P$  是外腔长度的周期函数, 其周期为  $\Delta L = \lambda/2$ , 角频率为  $\omega = 2\pi\nu$ 。当靶面移动时, 输出强度的峰值随半个共振周期移动。但是由于频率的非线性, 激光反馈干涉信号表现出非对

称性。参数  $\alpha$  和  $C$  是影响半导体激光器频谱特性和输出强度的重要参数。在弱反馈(相应  $C \leq 1$ ) 条件下, 半导体激光器单模运转, 见图 2(a); 在中等反馈(相应  $1 \leq C < 4.6$ ) 条件下, 半导体激光器虽然单模运转, 但是信号出现滞后现象, 见图 2(b)。半导体激光器的传感应用主要是在  $C < 4.6$  条件下。

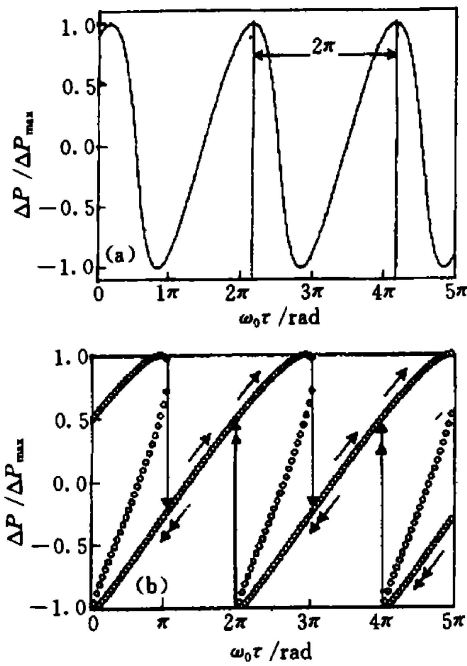


图2 相对输出强度  $\Delta P / \Delta P_{\max}$  随位相 ( $\omega_0 \tau$ ) 变化的理论波形

Fig. 2 Theoretical waveform of  $\Delta P / \Delta P_{\max}$  versus  $\omega_0 \tau$   
(a)  $C = 0.5$ ; (b)  $C = 3.05$  (with hysteresis)

激光反馈干涉信号常用条纹峰值计数方法分析, 但是位移测量精度仅在  $\lambda/2$ 。位相测量方法分析信号, 测量精度提高到几十分之一波长。有两种方法调制反馈干涉信号。外腔调制方法是改变外部腔长达达到调制参考位相。由于信号调制与距离无关, 外腔可以很短, 适用于微机械<sup>[11]</sup>。频率调制是常用的调制方法, 改变注入电流将同时调制光学频率和光输出功率。解调反馈干涉信号位相的方法有伪外差方法、锁相技术和相移技术<sup>[12-14]</sup>。

### 3 传感应用

理论研究表明, 激光反馈干涉的机理不同于传统的干涉。通常, 反馈干涉的信号是非对称的。但在一定的条件下, 外腔长度变化引起激光输出强度的波动, 类似于传统的双光束干涉现象, 即一个条纹移动对应半个光波波长的位移, 强度波动深度与传统双光束干涉系统相当。这个现象奠定了激光反馈

干涉传感的理论基础。实验中, 由于半导体激光器同时用作传感器的光源和探测器, 不需要传统干涉仪的分束器和参考镜光学元件, 易准直。这些优点使得半导体激光器的反馈干涉在部分应用领域优于传统干涉, 有潜力发展成新型传感仪器<sup>[15]</sup>。

#### 3.1 频率调制的激光反馈干涉仪测量速度和振动

如果外腔长度变化引起激光反馈干涉信号在测量时间  $T$  内的纹波数是  $N$ , 那么对应于测量目标的位移和速度是

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} \times N \quad v = \frac{\lambda}{2} \times \frac{N}{T} \quad (9)$$

用三角形波电流调制半导体激光器时, 光频率会产生偏移  $\Delta \nu$ 。输出强度  $P$  变化要受光频率和外腔长度共同影响。测量目标固定时, 调制驱动电流将通过激光腔折射率的变化改变复合腔的光程, 产生激光反馈干涉, 使得输出光强产生纹波变化。对于固定目标, 纹波的变化数在三角波的上升和下降段是相同的。在物体运动的情况下, 纹波数在上升和下降段不再相等。如果物体面向 LD 运动, 纹波数在下降段密集; 如果物体背向 LD 运动, 纹波数在上升段密集。如果在上升段的采样时间  $T_1$  内的纹波数是  $N_1$ , 在下降段的采样时间  $T_2$  内的纹波数是  $N_2$ , 那么在一个调制周期内测量目标的位移和速度是

$$\Delta L_i = \frac{\lambda}{2} \times \left| \frac{N_2}{T_2} - \frac{N_1}{T_1} \right| \quad v = \frac{\lambda}{4} \times \left| \frac{N_2}{T_2} - \frac{N_1}{T_1} \right| \quad (10)$$

用激光反馈效应测量振动, 方法是先测速度再对时间求和。用三角波电流调制半导体激光器, 调制的激光反馈干涉信号含有速度的信息。通过对时间求和, 获得振动位移, 见图 3。激光反馈干涉信号(图 3(a))经电压比较器得到两脉冲列  $N_1$  和  $N_2$ , 图 3(b) 和图 3(c) 分别对应三角波信号上升沿  $T_1$  和下

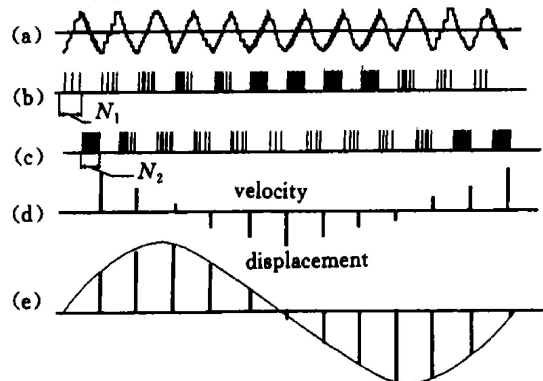


图3 测量速度和振动的信号处理示意图

Fig. 3 Diagram of signal processing for the measurement of velocity and vibration

降沿  $T_2$  上的波纹变化数。计算在一个调制周期内的速度(图 3(d)), 通过速度信号对时间求和, 获得振动位移(图 3(e))。

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2}(\Delta N)_1 + \frac{\lambda}{2}(\Delta N)_2 + \dots + \frac{\lambda}{2}(\Delta N)_n = \frac{\lambda}{2} \sum_{i=1}^n (\Delta N)_i \quad (11)$$

测量目标是一个扬声器的音乐振动, 测量的振动位移结果见图 4。LD 的波长为  $0.78 \mu\text{m}$ , 到靶面的距离为  $30 \text{ cm}$ , 扬声器的振幅在  $-23 \sim 39 \mu\text{m}$ 。

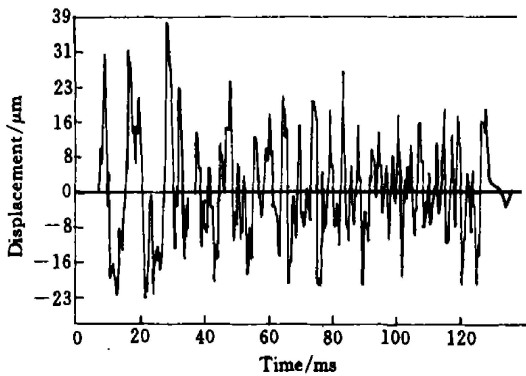


图 4 测量扬声器的振动波形

Fig. 4 Vibrating waveform of a vibrating loudspeaker

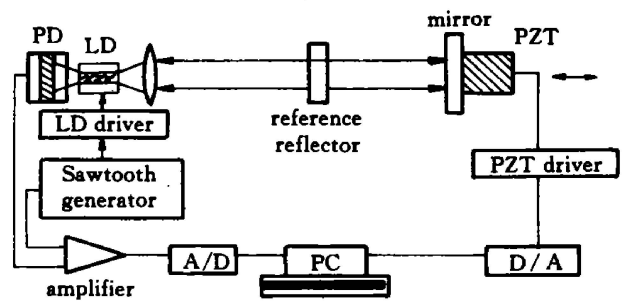


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

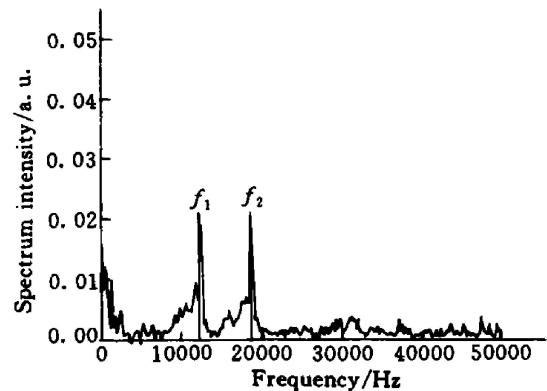


图 6 双外腔的傅里叶谱

Fig. 6 Fourier spectra of dual external cavities

### 3.2 双外腔、位相法激光反馈干涉仪测量微位移<sup>[16]</sup>

提出的双外腔的光学系统能同时测量位移和距离, 可以减少由于激光频率的涨落和外腔的空气扰动所带来的信号频率和位相的测量误差。参考外腔在参考反射镜和激光腔端面之间形成, 而测量腔在目标和激光腔端面之间形成,  $L_1$  和  $L_2$  是参考外腔和测量腔的长度, 见图 5。第一个峰值对应参考腔的共振频率  $f_1$  和相对位相  $\phi_{01}$ ; 第二个峰值对应测量腔的频率  $f_2$  和相对位相  $\phi_{02}$ 。已知参考反射镜的距离, 通过  $f_2$  和  $f_1$  的比率, 可以消去参数  $C$  和  $\alpha$ , 确定目标的距离

$$L_2 = L_1 \frac{f_2}{f_1} \quad (12)$$

用快速傅里叶变换方法(FFT)提取信号位相<sup>[17]</sup>

$$\phi = \phi_{01} \frac{f_2}{f_1} - \phi_{02} + 2\pi \left[ \frac{f_2}{f_1} m - n \right] \quad (13)$$

并且获得相对位移

$$d = \frac{C}{4\pi\nu_0} \phi \quad (14)$$

由于光学频率的扰动产生的信号位相误差对两个外腔来说是相同的, 使用参考外腔能补偿误差。

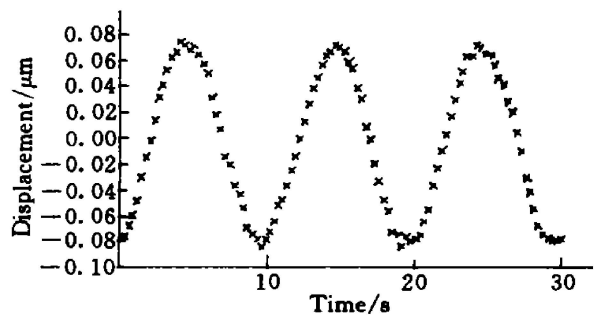


图 7 位移测量的结果

(正弦振动: 峰-峰值振幅  $0.16 \mu\text{m}$ , 频率  $0.1 \text{ Hz}$ )

Fig. 7 Measurement result of displacement

(A sinusoidal vibration with  $0.16 \mu\text{m}$  p-p and  $0.1 \text{ Hz}$ )

实验系统包括 LD(Sharp LT021MFO:  $780 \text{ nm}$ ,  $10 \text{ mW}$ , 内封装光电二极管 PD), 一个非球面的校准透镜和参考镜。靶镜被平台上的测微计和压电陶瓷(PZT)致动器移动, 通过测微计改变距离, 通过 PZT 控制位移。采集的干涉信号由差分电路先进行预处理, 然后用 FFT 分析技术确定参考外腔和测量腔的两个频率, 计算载频的傅里叶系数获得初始位相。图 6 是激光反馈干涉信号的傅里叶频谱。两个信号的频率分别是  $f_1 = 12368 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 18727 \text{ Hz}$ 。实验显示了计算机控制 PZT 驱动的位移测量结果。图 7

是正弦振动的测量结果。目标以 0.1 Hz 的频率和 160 nm(峰-峰值)的振幅振动。测量结果包含噪声振幅大约 12 nm, 位移测量精度达  $\lambda/60$ 。

#### 4 激光反馈干涉与普通干涉仪的比较

迈克尔逊干涉信号是正弦波。在弱反馈条件下 ( $C \ll 1$ ), 激光反馈干涉信号是正弦波。激光反馈干涉与普通干涉仪有相同的位相灵敏度。随着反馈强度的增加, 激光反馈干涉信号逐步变成非对称的锯齿波。条纹的偏斜方向取决于目标的运动方向。激光反馈干涉有比较大的信号幅度, 还可以有比较大的调制深度。

传统的激光多普勒速度仪通常要用外差方法测量多普勒频率。但是激光反馈干涉的多普勒拍频信号是由多普勒移动光和激光腔内的光的干涉形成。所以可以称激光反馈干涉为自外差系统。

因为激光反馈干涉的光学系统只需要半导体激光器、聚焦透镜, 系统只有一个光轴, 容易校直, 所以称为自准直系统。系统结构简单紧凑。

激光反馈干涉系统造价低。半导体激光器和聚焦透镜价格不高, 不需要其他附件(光电二极管等)。

由上述特点可见, 激光反馈干涉的理论研究和传感技术在工程领域有广泛应用前景。

#### 参 考 文 献

- 1 R. O. Miles, A. Dandridge, A. B. Tveten *et al.*. Feedback-induced line broadening in cw channel-substrate planar laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37** (11): 990~ 992
- 2 J. Mørk, B. Tromborg, P. L. Christiansen. Bistability and low-frequency fluctuations in semiconductor lasers with optical feedback: A theoretical analysis [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2): 123~ 133
- 3 C. H. Henry, R. F. Kazarinov. Instabilities of semiconductor lasers due to optical feedback from distant reflectors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **22** (2): 294~ 301
- 4 T. Mukai, K. Otsuka. New route to optical chaos: successive subharmonic oscillation cascade in a semiconductor lasers coupled to external cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(17): 1711~ 1714
- 5 S. Shinohara, A. Mochizuki, H. Yoshida *et al.*. Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25** (9): 1417~ 1419
- 6 F. Gouaux, N. Servagent, T. Bosch. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(28): 6684~ 6689
- 7 S. Donati, G. Giuliani, S. Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurements of displacements without ambiguity [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31** (1): 113~ 119
- 8 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **16**(3): 347~ 350
- 9 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
- 10 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~ 1558
- 11 Ming Wang, Guanming Lai. Displacement measurement based on Fourier transform method with external laser cavity modulation [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72** (8): 3440~ 3445
- 12 J. Kato, N. Kikuchi, I. Yamaguchi *et al.*. Optical feedback displacement sensor using a laser diode and its performance improvement [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1995, **6**(1): 45~ 52
- 13 B. Ovrzyn, J. H. Andrews. Phase-shifted laser feedback interferometry [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(14): 1078~ 1080
- 14 T. Suzuki, S. Hirabayashi, O. Sasaki *et al.*. Self-mixing type of phase-locked laser diode interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(3): 543~ 548
- 15 T. Bosch, F. Gouaux, N. Servagent. Optical feedback interferometry for sensing application [C]. *Proceeding of ODIMAP*  $\oplus$  on Optoelectronic Distance Measurement and Application, 1999. 141~ 151
- 16 Ming Wang, Takahiko Sato, Guanming Lai *et al.*. Self-mixing interferometry for distance and displacement measurement by Fourier transform method [C]. *SPIE*, 2000, **3945**: 193~ 200
- 17 Ming Wang. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis [J]. *Optics and Laser Technology*, 2001, **33**(6): 409~ 416