

文章编号: 0258-7025(2008)01-0097-05

适度光反馈机制下线宽展宽因数的自动测量

禹延光 袁秀娟

(郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450052)

摘要 介绍了光反馈自混合干涉(OFSMI)法测量半导体激光器线宽展宽因数(LEF)的基本原理。针对不同参数条件,分析了该测量方法的理论误差,找出了最佳测量条件和最佳测量条纹位置。并根据光反馈自混合干涉信号特点,设计了一个自动测量算法。该算法可以自动识别提取一个振动周期内的光反馈自混合干涉信号所有特征值,采用最佳测量条纹位置所对应的特征值,就可以精确得到线宽展宽因数。仿真数据验证了自动测量算法的正确性。实验结果表明,自动测量算法在实际数据处理时测量参数的精确度较好,当自混合信号的峰-峰值为1.75 V时,线宽展宽因数的相对标准差只有3.26%。

关键词 测量;线宽展宽因数;半导体激光器;自混合干涉;适度光反馈

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Automatic Measurement of the Linewidth Enhancement Factor Based on Moderate Optical Feedback

Yu Yanguang Yuan Xiujuan

(College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract The basic principle of measuring the linewidth enhancement factor (LEF) using optical feedback self-mixing interference (OFSMI) method is introduced. The theoretical errors are analyzed at different parameters, and the optimal measurement conditions and stripe positions are given. Based on the characteristics of optical feedback self-mixing interference signal, an automatic measurement algorithm is developed. The algorithm can automatically identify and extract all eigenvalues of optical feedback self-mixing interference signal in one vibrant period, and the accurate estimation linewidth enhancement factor can be obtained by the eigenvalues at the optimal measurement stripe position. The simulative data have verified the effectiveness of automatic measurement algorithm. The experimental results show that the accuracy of measuring parameters is better in processing data, and the relative standard error of linewidth enhancement factor is 3.26% when peak-peak value of self-mixing signal is 1.75 V.

Key words measurement; linewidth enhancement factor; semiconductor lasers; self-mixing interference; moderate optical feedback

1 引言

半导体激光器与其他类型的激光器不同,注入载流子浓度的变化会导致折射率和增益的较大变化,从而引起谱线展宽等变化。线宽展宽因数(LEF)用于描述该变化程度,它是表征半导体激光器的一个重要参数,其数值大小反映半导体激光器的很多方面的性能,如线宽、模式稳定、电流调制下的啁啾、光放大系数、光反馈效应、注入锁定范围

等^[1,2]。

半导体激光器线宽展宽因数的测量一直是一个研究热点,目前已有许多测量方法^[2~6]。基于光反馈自混合干涉(OFSMI)的线宽展宽因数测量有最小二乘估计法和梯度最优估计法^[7~9],不过这两种方法都是基于弱光反馈水平。Yanguang Yu等^[10]曾提出了一种适度光反馈水平下基于光反馈自混合干涉法的线宽展宽因数测量原理,针对不同系统参数条件,找出了最佳测量条件和最佳测量条纹位置。

收稿日期:2006-12-15; 收到修改稿日期:2007-06-21

基金项目:国家自然科学基金(60574098)和教育部重点项目(206086)资助课题。

作者简介:禹延光(1964—),女,河南人,教授,博士,主要研究方向为新型传感理论与技术、数字信号处理。

E-mail: yanguangyu@zzu.edu.cn

本文在适度光反馈机制下半导体激光器参数的测量原理上,建立了一个激光器线宽展宽因数的自动测量算法,并通过仿真和实验验证了算法的精确性和可行性。

2 测量理论

光反馈自混合干涉的基本模型^[7~10]为

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

$$G[\phi_0(\tau)] = \cos[\phi_F(\tau)], \quad (2)$$

$$P[\phi_F(\tau)] = P_0 \{1 + mG[\phi_F(\tau)]\}, \quad (3)$$

式中 α 为线宽展宽因数, m 为调制系数(典型值 $m \approx 10^{-3}$), $G[\phi_0(\tau)]$ 为光反馈自混合干涉函数, $P[\phi_F(\tau)]$ 为有光反馈时的输出光强, P_0 为无光反馈时的输出光强, $\phi_F(\tau) = \omega_F \tau$ 为带反馈的外腔器相位, ω_F 为含外腔的激光角频率, $\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau$ 为不带反馈的外腔器相位, ω_0 为不含外腔的激光角频率, C 为系统反馈水平因数, $\tau = 2L_E/c$ 为光在外腔内飞行的往返时间, L_E 为外腔长, c 为真空中光速。

在适度光反馈水平($1 < C < 4.6$)时,光反馈自混合干涉的基本模型中 $\phi_F(\tau)$, $G[\phi_0(\tau)]$ 与 $\phi_0(\tau)$ 的理论关系分别如图1所示,图中A, B, C, D所围成的区域称为滞回区^[11]。文献[10]所提出的测量方法是测出图1(b)中的过零点位置 ϕ_1, ϕ_4 和跳变点位置 ϕ_2, ϕ_3 , 从而得到相位差 ϕ_{13}, ϕ_{24}

$$\phi_{13} = \sqrt{C^2 - 1} + \frac{C}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} + \arccos\left(-\frac{1}{C}\right) - \arctan \alpha + \frac{\pi}{2}, \quad (4a)$$

$$\phi_{24} = \sqrt{C^2 - 1} - \frac{C}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} + \arccos\left(-\frac{1}{C}\right) + \arctan \alpha - \frac{\pi}{2}, \quad (4b)$$

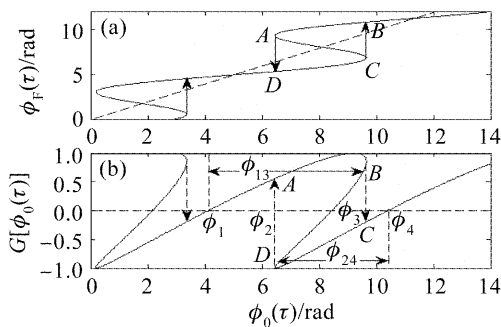


图1 适度光反馈机制下 $\phi_F(\tau)$ (a) 和 $G[\phi_0(\tau)]$ (b) 与 $\phi_0(\tau)$ 的关系

Fig. 1 $\phi_F(\tau)$ (a) and $G[\phi_0(\tau)]$ (b) versus $\phi_0(\tau)$ on moderate optical feedback

ϕ_{13}, ϕ_{24} 是 τ 的函数,而实验所得的数据是 $P[\phi_F(\tau)]$ 与时间 t 有关的函数 $P(t)$, 经归一化处理后再归一化函数 $G(t)$ 与时间 t 的关系曲线如图2所示。

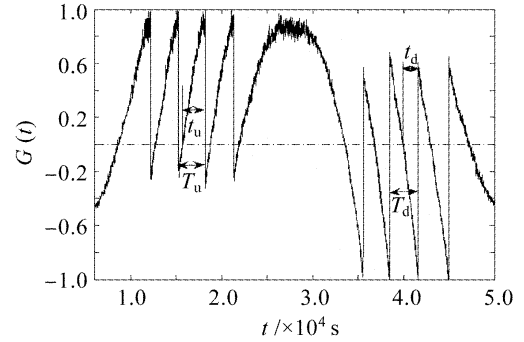


图2 归一化函数 $G(t)$ 与时间 t 的关系曲线

Fig. 2 Normalized function $G(t)$ versus time t

ϕ_{13}, ϕ_{24} 与实验所采集的某一对干涉条纹所对应的的时间间隔 T_u, t_u, T_d, t_d 之间存在关系

$$\frac{t_u}{T_u} = \frac{\phi_{13}}{2\pi}, \quad (5a)$$

$$\frac{t_d}{T_d} = \frac{\phi_{24}}{2\pi}, \quad (5b)$$

式中 T_u 为上干涉条纹两跳变点间的时间间隔; t_u 为上干涉条纹的过零点到下跳变点的时间间隔; T_d 为下干涉条纹两跳变点间的时间间隔; t_d 为下干涉条纹的过零点到上跳变点的时间间隔。然后,由实验得到的时间间隔 T_u, t_u, T_d 和 t_d 通过(5)式求出 ϕ_{13} 和 ϕ_{24} , 再由(4)式获得参数 α 。

3 自动测量算法

由(1)~(3)式可知,通过改变外腔长度 L_E , 可以得到强度函数随时间变化的信号,记作 $P(t)$ 。本文施加正弦波动的外腔,以获得相应的光反馈自混合干涉信号^[12~14]。

首先建立光反馈自混合干涉信号。由(1)~(3)式可知函数 $G[\phi_0(\tau)]$ 与 α, τ, C 之间的关系在测量中起到了相当重要的作用,从而引入光反馈自混合干涉函数

$$G(\alpha, \tau, C) = \cos\{\phi_0(\tau) - C \sin[\phi_F(\tau) + \arctan \alpha]\}, \quad (6)$$

假定外部物体做简谐运动,其运动规律为 $L = L_0 + \Delta L \sin(2\pi ft)$, 其中 L_0 为激光辐射面和外反射体间的初始距离, f 为振动频率,则外部光相位为

$$\phi_0(\tau) = \omega_0 \tau = \frac{4\pi L_0}{\lambda_0} + 4\pi \frac{\Delta L}{\lambda_0} \sin(2\pi ft), \quad (7)$$

式中 λ_0 为无光反馈时激光的中心波长。

假定初始相位 $\varphi_0 = 4\pi L_0/\lambda_0 = 3.9 \times 10^6$, 振幅

$A = 4\pi\Delta L/\lambda_0 = 6\pi$, 振动频率 $f = 30$ Hz, 则

$$\phi_0(t) = \varphi_0 + A\sin(2\pi ft) = 3.9 \times 10^6 + 6\pi\sin(60\pi t). \quad (8)$$

图 3(a) 给出了振动信号 $\phi_0(t)$ 与 t 的关系波形图。当 $C = 2.5, \alpha = 4$ 时, $G(t)$ 与 t 的关系波形图如图 3(b) 所示。从图 3 可看出, 正弦振动信号的幅值最大值处为信号转折中心(图中虚线位置); 振动幅值增大区域所对应的信号称为上干涉条纹段, 幅值减小区域所对应的信号称为下干涉条纹段。每个振动周期内, 上干涉条纹数等于下干涉条纹数, 且以转折中心为参考中心成对出现。图 3(b) 所示是条纹对数 $N = 4$ 的信号, 它有 N 个上干涉条纹和 N 个下干涉条纹。同时它有 N 个上干涉条纹过零点(记为 t_{i-u-z}) 和 N 个下干涉条纹过零点(记为 t_{i-d-z}), $N+1$ 个上干涉条纹跳跃点(记为 t_{i-u-j}) 和 $N+1$ 个下干涉条纹跳跃点(记为 t_{i-d-j})。为实现自动测量算法, 在编程计算过程中将条纹编序如图 3(b) 标注的数字序列, 即按振动信号的振幅由小到大的方向由 1 到 N 自然序列排序。则第 i 个干涉条纹有 t_{i-u-j} 和 $t_{i+1-u-j}$ 两个上干涉条纹跳跃点, t_{i-d-j} 和 $t_{i+1-d-j}$ 两个下干涉条纹跳跃点, 一个上干涉条纹过零点 t_{i-u-z} 和一个下干涉条纹过零点 t_{i-d-z} 。

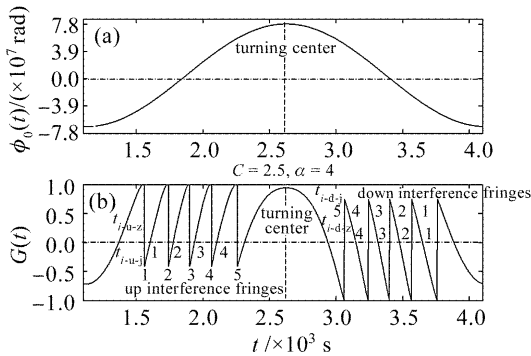


图 3 振动信号 $\phi_0(t)$ (a) 和归一化函数 $G(t)$ (b) 与时间 t 的关系曲线

Fig. 3 Vibrant signal $\phi_0(t)$ (a) and normalized function $G(t)$ (b) versus time t

对光反馈自混合干涉信号进行处理, 可以提取所有条纹的过零点和跳变点及所需时间间隔, 步骤为:

1) 选取一个振动周期的信号数据 $G(t)$, 如图 4(a) 所示;

2) 对 $G(t)$ 直接进行差分运算得 $F(t)$, 则可提取出 $G(t)$ 的所有特征点, 即其上干涉条纹跳跃点 t_{i-u-j} 和下干涉条纹跳跃点 t_{i-d-j} (如图 4(b)), 且由干涉条纹跳跃点的个数确定条纹数 N 为跳跃点数减 1;

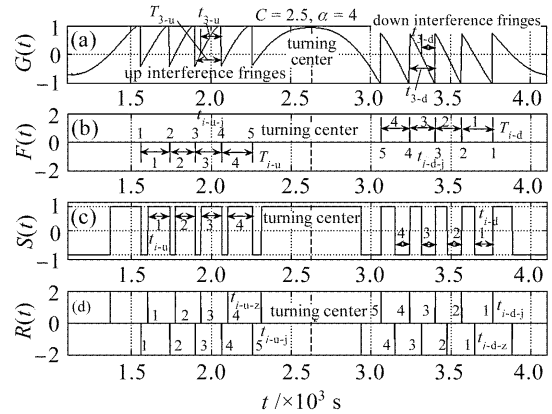


图 4 归一化函数 $G(t)$ (a), $F(t)$ (b), 符号函数 $S(t)$ (c), $R(t)$ (d) 与时间 t 的关系曲线

Fig. 4 Normalized function $G(t)$ (a), $F(t)$ (b), symbolic function $S(t)$ (c), $R(t)$ (d) versus time t

3) 对 $G(t)$ 求符号函数 $S(t)$, 如图 4(c) 所示, 然后再对其进行差分计算得函数 $R(t)$ 如图 4(d), 即可根据上、下干涉条纹特征点的位置, 确定 $G(t)$ 所有上、下干涉条纹过零点及跳跃点;

4) 计算每对条纹所对应的时间间隔 $T_{i-u}, t_{i-u}, T_{i-d}, t_{i-d}$ 。上干涉条纹的时间间隔 $T_{i-u} = t_{i+1-u-j} - t_{i-u-j}$, $t_{i-u} = t_{i+1-u-j} - t_{i-u-z}$; 下干涉条纹的时间间隔 $T_{i-d} = t_{i+1-d-j} - t_{i-d-j}$, $t_{i-d} = t_{i-d-j} - t_{i-d-z}$ 。

5) 计算 α 的值。将 $T_{i-u}, T_{i-d}, t_{i-u}, t_{i-d}$ 代入(5)式, 求出第 i 对条纹对应的 α 值。重复上述步骤, 实现每对条纹所对应 α 的测量。

利用该算法原理, 固定 $f = 40$ Hz, $\varphi_0 = 3.9 \times 10^6$, $C = 2$, 改变 A 和 α 的值, 对一系列光反馈自混合干涉数据进行仿真计算, 观察一个信号周期内各对条纹所对应 α 的测量值与 α 的实际值, 对比情况如图 5 所示, (a1), (a2), (a3) 为 $A = 6\pi, \alpha$ 分别等于 2,

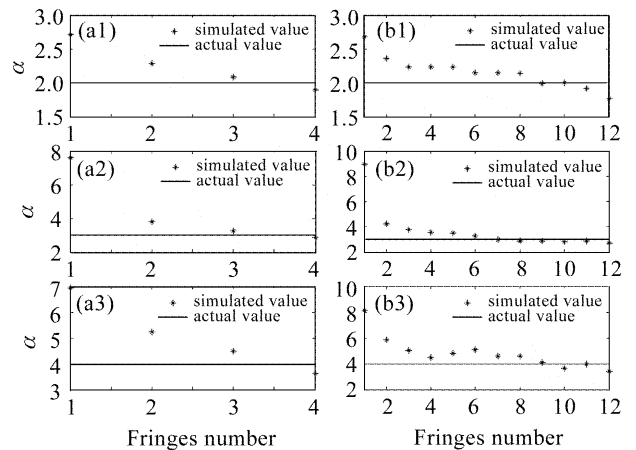


图 5 每对条纹所对应线宽展宽因数的测量结果
Fig. 5 Measurement results of LEF according to every fringes

(a1)~(a3): $A = 6\pi$; (b1)~(b3): $A = 14\pi$

3,4 时的仿真测量结果,(b1),(b2),(b3)为 $A = 14\pi$, α 分别等于 2,3,4 时的仿真测量结果。显然,第一对条纹所计算出的线宽展宽因数值,其测量误差最大。假设一个周期内的条纹对数(即上、下干涉条纹数)为 N ,将 $N/2$ 取整记为 M ,则第 M 对条纹即中间条纹对的测量误差较小。因此给出最佳测量条纹选取规则,若条纹对数 N 小于 4,令中间条纹(第 M 对条纹)为测量条纹;若条纹对数 N 大于 4,取第 $M, M+1, M+2$ 对条纹为测量条纹,其测量平均值

表 1 线宽展宽因数的仿真测量结果

Table 1 Simulative measurement results for LEF

Parameters		Signal 1	Signal 2	Signal 3	Signal 4	Signal 5	Signal 6
Real value	A	6π	8.5π	14π	14π	8.2π	8.2π
	C	2	2	2	2.5	2.5	2.5
	α_0	2	2	3	3	2.5	2.2
Measuring results	α	2.083	2.086	3.040	3.001	2.599	2.279
	$\delta_\alpha / \%$	4.15	4.30	1.33	0.03	3.96	3.59

4 实 验

由于在实验过程中存在的扰动及电子噪声的干扰等因素,因此需要剔出光反馈自混合干涉原始采样信号中的随机噪声及波动,可根据实验数据的特点采用 5 点平滑技术剔出"毛刺",并对实验数据进行归一化处理。由(2),(3)式得归一化方程

$$G(t) = \frac{P(t) - P_0}{mP_0}. \quad (9)$$

图 6(a),(b)分别为两组不同光反馈自混合干涉实验数据进行预处理前后的结果。

基于最佳测量条纹选取准则和最佳测量条件,将自动算法应用于实验数据。实验采用激光管 HL7851G,偏置电流为 80 mA,工作在单模状态;信

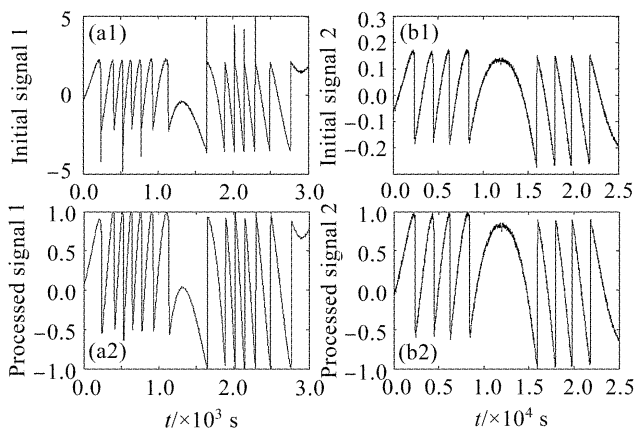


图 6 两组不同光反馈自混合干涉预处理前后的信号

Fig. 6 Two groups of different initial and pre-processed experimental OFSMI signals

为最终结果。由于本自动测量方法适用于具有过零点的光反馈自混合干涉信号,而由于当 $C > 3$ 时,光反馈自混合干涉信号的部分过零点消失,因此本算法的最佳测量条件为 $1 < C < 3$ 。

利用最佳测量条纹选取规则和最佳测量条件,固定 $f = 40$ Hz, $\varphi_0 = 3.9 \times 10^6$,给定 A, C 和 α_0 的值,得到光反馈自混合干涉信号仿真参数测量结果如表 1 所示,其中 δ_α 为测量值 α 的相对误差。

号发生器产生的正弦信号频率为 195 Hz,峰-峰值为 10 V;温度控制器将半导体激光器的温度控制在 $(25 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。在此实验条件下,测量得到的一组数据如图 7 所示。可以看出,此时光反馈自混合干涉信号的峰-峰值为 1.75 V。

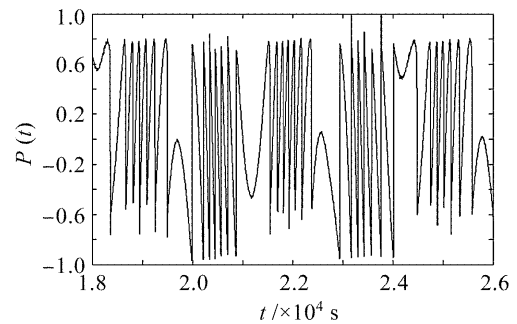


图 7 测量得到的光反馈自混合干涉信号

Fig. 7 Measured OFSMI signal

选取 10 组不同数据进行估计,将 10 次估计的均值作为最终估计结果,即 $\hat{\alpha} = (\sum_{i=1}^{10} \hat{\alpha}_i) / 10$, $\hat{C} = (\sum_{i=1}^{10} \hat{C}_i) / 10$ 。将 $\hat{\alpha}$ 和 \hat{C} 的标准差分别记为 σ_α 和 σ_C ,用 $\sigma_\alpha / \hat{\alpha}$ 和 σ_C / \hat{C} 的百分比描述仿真结果的精确性。

表 2 参数测量结果

Table 2 Measuring Results of the Parameters

Peak-peak value / V	$\hat{\alpha}$	σ_α	$\sigma_\alpha / \hat{\alpha}$	\hat{C}	σ_C	σ_C / \hat{C}
1.75	3.053	0.0995	3.26%	1.918	0.0488	2.54%

对图 7 所示的测量数据处理结果如表 2 所示。可以看出,该算法在实际数据处理时测量参数的精

精度较好,当自混合信号的峰-峰值为1.75 V时,线宽展宽因数的相对标准差只有3.26%。而文献[10]所提算法的测量结果是 $\hat{\alpha}$ 为3.229, $\sigma_{\hat{\alpha}}/\hat{\alpha}$ 为6.80%。

5 结 论

在适度光反馈机制下半导体激光器参数的测量原理上,建立了一个激光器线宽展宽因数的自动测量算法,并通过仿真和实验验证了该算法的精确性和可行性。结果表明,算法在实际数据处理时参数测量的精确度较好,当自混合信号的峰-峰值为1.75 V时,线宽展宽因数的相对标准差只有3.26%,且测量快捷方便。此外,该测量算法的实现为基于光反馈自混合干涉技术的其他传感测量(如振动测量)提供了潜在的应用。

参 考 文 献

- 1 M. Osinski, J. Buus. Linewidth broadening factor in semiconductor lasers—An overview [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1):9~28
- 2 G. Liu, X. Jin, S. L. Chuang. Measurement of linewidth enhancement factor of semiconductor lasers using an injection-locking technique [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5):430~432
- 3 L. Shterengas, G. L. Belenky, A. Gourevitch. Measurements of α -factor in 2 ~ 2.5 μm type-I In (Al) GaAsSb/GaSb high power diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(24):4517~4519
- 4 T. B. Simpson, F. Doft, E. Strzelecka *et al.*. Gain saturation and the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):776~778
- 5 Asier Villafranca, José A. Lázár, Iñigo Salinas *et al.*. Measurement of the linewidth enhancement factor in DFB lasers using a high-resolution optical spectrum analyzer [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(11):2268~2270
- 6 A. Hsu, J.-F. P. Seurin, S. L. Chuang *et al.*. Optical feedback in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(12):1643~1649
- 7 Yu Yan-guang, Li Shi-yang, Ye Hui-ying *et al.*. Estimation for the parameters of semiconductor lasers using the self-mixing effects in semiconductor lasers [C]. Xi'an, China. Proceedings of the Third International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2004. 665~670
- 8 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. Quantum Electron.*, 2005, **41**(8):1058~1064
- 9 Yu Yanguang, Yan Yanxia. An approach for measuring parameters of semiconductor lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **6**(2):114~117
禹延光,闫艳霞. 半导体激光器线宽展宽因数的估计方法[J]. *激光与红外*, 2006, **6**(2):114~117
- 10 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
- 11 S. Donati, G. Giuliani, S. Merlo. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1):113~119
- 12 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
- 13 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
- 14 Shi Bingbo, Zhao Jianlin, Li Zeren. Numerical simulation and experimental study of displacement measurement based on self-mixing interference [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1415~1420
施冰皓,赵建林,李泽仁. 激光自混合干涉式位移测量数据模拟及实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1415~1420