

文章编号: 0253-2239(2005)09-1219-6

非即变相位共轭反馈对半导体激光器动态特性的影响*

张伟利 潘 炜 罗 斌 王梦遥 邹喜华

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 从四波混频产生相位共轭的物理原因出发,定义了相位共轭镜(PCM)的响应时间,建立起非即变相位共轭反馈条件下半导体激光器的外腔模型。以响应时间及频率失调为参变量,对其分岔及噪声等动态行为进行数值分析。结果表明,不考虑噪声影响时,增加相位共轭镜响应时间会使混沌带出现的次数和范围得到较大的抑制,当响应时间增大到 1.5 ns 时,混沌带消失,半导体激光器保持稳定的单周期状态;考虑噪声影响后,随着响应时间的相对强度噪声(RIN)可减小几 dB 甚至十几 dB,产生突变需要的反馈量也增大一个数量级以上,且其频谱的峰值向高频方向移动;另外,由于共轭反馈引起的频率失调低于半导体激光器激光频率 3 个数量级以上,它只对分岔特性有影响,对相对强度噪声的影响几乎为零。

关键词: 激光技术; 半导体激光器; 相位共轭反馈; 分岔; 相对强度噪声; 响应时间

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

The Influence of Non-Instantaneous Phase Conjugate Optical Feedback on the Dynamics of Semiconductor Laser

Zhang Weili Pan Wei Luo Bin Wang Mengyao Zou Xihua

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Based on the physical origin of phase conjugation generated by four wave mixing, the response time of phase conjugate mirror is defined and the external cavity model for laser diode under non-instantaneous phase conjugate optical feedback is set up. Numerical analysis is given to discuss the influence of response time and frequency detuning on the characteristics of bifurcation and noise. The results indicate that the numbers and the range of chaotic bands can be restrained greatly by increasing the phase conjugate mirror's response time when the influence of noise is considered. When the response time reaches 1.5 ns, all the instabilities of laser diode are suppressed. If noises considered, the intensity of relative intensity noise decreases by several dB or even tens dB with the increase of response time and its spectrum peak moves to higher frequency, the feedback rate for coherence collapse also increases by one order. Since the frequency detuning is smaller compared to laser diode lasing frequency by more than three orders of magnitudes, it only influences the bifurcation diagram and almost have no influence on relative intensity noise.

Key words: laser technique; semiconductor laser; phase conjugate feedback; bifurcation; relative intensity noise (RIN); response time

1 引 言

与常规光反馈(COF)不同,相位共轭光反馈(PCF)光具有时间反演特性,它可用来进行色散补偿、图像处理等^[1];它在外腔往返一次相位积累为零,用相位共轭镜(PCM)作为外部反射镜,对放置位置的精确程度没有常规光反馈高,能较好地压窄线宽,产

生高质量光束,实现激光器的锁模、锁相等^[2,3];相位共轭光反馈对于气体以及半导体激光器的强度噪声也有较好的抑制,用相位共轭镜耦合单个激光器还可以形成新型的输出阵列^[4]。近来相位共轭光反馈条件下半导体激光器的特性及其潜在应用吸引了众多研究者的目光,这其中包括动静态以及分岔特性的

* 国家自然科学基金(10174057, 90201011)、国家教育部科学技术研究重点项目(105148)、国家重点实验室开放课题(2002KF)和四川省应用基础科学研究(03JY029-048-1)资助课题。

作者简介: 张伟利(1980~),男,河南南阳人,西南交通大学光通信方向博士研究生,主要从事半导体激光器和光通信方面的研究。E-mail: daduoer@126.com

收稿日期: 2004-09-27; 收到修改稿日期: 2005-01-19

研究^[5~7],有关于噪声抑制和线宽压窄的讨论^[4,8,9],频率控制的应用^[3],还有学者提出相位共轭光反馈条件下主从半导体激光器的混沌同步模型^[10]等。

目前关于相位共轭光反馈条件下半导体激光器的研究大都基于 Lang 和 Kobayashi 提出的理想模型^[11],即认为相位共轭镜的响应时间为零,该假设对于讨论外腔长度、反馈强度以及注入电流大小等参量对半导体激光器各种特性的影响较为方便。但在实际中从光入射到产生共轭,相位共轭镜是需要响应时间的(非即变),例如在克尔(Kerr)型非线性材料中通过四波混频(FWM)产生相位共轭光所需时间较短,在飞秒到皮秒量级,而在原子蒸气或多量子阱半导体材料中响应时间要达到纳秒量级^[8]。这样 Lang 等的理论模型就不再适用,我们需要引入与响应时间相关的参量。文献^[1,12]建立起的反馈模型,较好地完成了零失调量条件下响应时间对半导体激光器的影响,但也仅限于稳态特性和锁模条件等的讨论,关于响应时间对动态及噪声影响的讨论涉及较少。

因此,清楚不同响应时间对半导体激光器非线性分岔特性、尤其是对噪声存在时的动态特性的影响如何,对我们有目的地选择相位共轭镜类型控制半导体激光器输出动态具有指导意义,这正是本文所要讨论和解决的问题。与前人工作不同,从相位共轭镜产生相位共轭的物理原因出发,定义其响应时间;综合考虑到相位共轭镜响应时间和频率失调,推出非即变相位共轭光反馈条件下半导体激光器的理论模型;并通过引入噪声项来完善该非既变模型,由此分析响应时间对分岔特性和强度噪声的影响。

2 数学模型的建立

相位共轭反馈下半导体激光器经典速率方程表示如下^[1]:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \{-iaG_N[N(t) - N_{th}] + [G(t) - 1/\tau_p]\}E(t) + kE_{ext}(t, \tau), \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_e} - G(t)|E(t)|^2, \quad (2)$$

其中 E 表示复光场, N 表示载流子数, τ_p, τ_e 分别表示光子和载流子寿命, N_{th} 为阈值载流子数, a 为线宽增强因子, $G(t)$ 为光增益, I 为注入电流。

对于非即变的相位共轭光反馈,(1)式第二项就不能用一定延时的入射光取共轭表示了,必须考虑响应时间的影响。 k 为反馈率,它表示外腔耦合强度,是与响应时间无关的常量;那么外部反馈项 $E_{ext}(t, \tau)$ 的表达是联系响应时间的关键。我们作如下讨论。

相位共轭镜以光折变晶体为材料采用自抽运形式,通过四波混频得到共轭反馈光。若 ω_0 表示半导体激光器激射频率, δ 表示频率失调量; r_{PCM} 表示反射系数(相位共轭光与入射光振幅之比,在不考虑响应时间的情况下 $r_{PCM} = 1$)。则非即变条件下,相位共轭镜反馈项表示为

$$E_{ext}(t) = r_{PCM} E^*(t - \tau) \exp[2i\delta(t - \tau/2)], \quad (3)$$

用 A_1, A_2 表示两个抽运光振幅, A_3, A_4 分别表示共轭光和入射光振幅, L_m 表示相位共轭镜作用长度, α 表示归一化线性吸收系数, p 表示抽运效率 $p = |A_2(L_m)/A_1(0)|^2$ 。根据 r_{PCM} 定义以及四波混频的四束光振幅之间的关系^[13],可得

$$r_{PCM} = \frac{A_3(0)}{A_4^*(0)} = -\frac{A_2(L_m)}{A_1^*(0)} \frac{\int_0^{\gamma L_m} \frac{\exp(-x) dx}{1 + p \exp(-2\alpha L_m) \exp(4\alpha x)}}{\int_0^{\gamma L_m} \frac{\exp(-x) dx}{1 + p \exp(-2\alpha L_m) \exp(4\alpha x)} - 1} \exp(-\alpha \gamma L_m), \quad (4)$$

积分上限中 γ 的为定义的耦合常量,若给出复常量 $n_1 \exp(-i\varphi)$ (它由晶体内光束干涉形成的全息图像决定)以及信号光与晶体表面的夹角 θ ,则

$$\gamma = i\omega_0 n_1 \exp(-i\varphi) / (2c \cos \theta). \quad (5)$$

图1为不同耦合常量取值条件下相位共轭反射强度 $|r_{PCM}|^2$ 随抽运率变化的曲线,可以看出每条曲线都有一个峰值对应不同的抽运率。实线对应 γL_m 取正值,随着 γL_m 的减小曲线向右下方移动;虚线对应 γL_m 取负值,随着 γL_m 的增大曲线向左下方移动。

γ 和 $-\gamma$ 对应的曲线关于 $r = 1$ 基本对称,这是因为 γ 的正负由信号光与晶体表面夹角决定,信号光反向入射,反射强度基本保持不变。

以上分析可以直观地看出参量 p 和 γL_m 对反射强度的影响。对于给定系统, p 和 α 是基本确定的,那么 γL_m 必是响应时间的函数。假定两抽运光互为共轭光且振幅保持不变 ($p = 1$),在不考虑吸收 ($\alpha = 0$) 的近似情况下,将(5)式带入(4)式可得

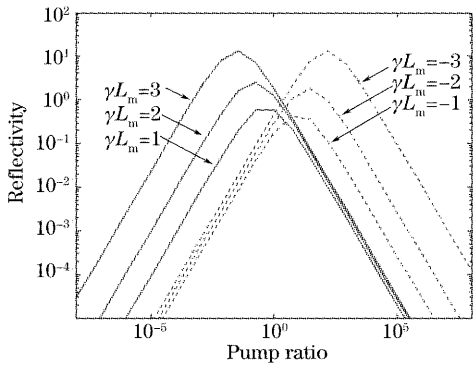


图 1 相位共轭反射强度随抽运率的变化情况($\alpha=0$)

Fig. 1 Phase conjugate intensity reflectivity versus pump ratio ($\alpha=0$)

$$r_{PCM} = \frac{1 - \exp\left\{\frac{-i\omega_0}{2c\cos\theta / [\exp(-i\varphi)n_1L_m]}\right\}}{1 + \exp\left\{\frac{-i\omega_0}{2c\cos\theta / [\exp(-i\varphi)n_1L_m]}\right\}}, \quad (6)$$

观察(6)式发现, $-2c\cos\theta / [\exp(-i\varphi)n_1L_m]$ 是由相位共轭镜内部参量决定,且单位取时间的倒数,故定义它为相位共轭镜的带宽.则(6)式简化为

$$r_{PCM} = -\frac{1 - \cos(\omega_0/\omega_m) - i\sin(\omega_0/\omega_m)}{1 + \cos(\omega_0/\omega_m) + i\sin(\omega_0/\omega_m)}, \quad (7)$$

通常 $\omega_m \gg \omega_0$, 取近 $\cos(\omega_0/\omega_m) = 1$ 和 $\sin(\omega_0/\omega_m) =$

ω_0/ω_m , 并令 $t_m = 1/\omega_m$, 则由(7)式得

$$r_{PCM} = -t_m / (t_m - 2i/\omega_0), \quad (8)$$

由此我们得出反射系数与响应时间的关系,接下来就可以讨论响应时间对半导体激光器动态特性影响.由(1)式~(3)式和(8)式建立起非即变相位共轭光反馈下半导体激光器的数学模型,基于前期工作^[14~16],在 Simulink 仿真平台下,采用模块化的函数来实现数值解,明显提高了仿真速率.仿真中除直接给出的参量取值外,其它参量见参考文献[5].

3 仿真与分析

3.1 分岔特性

调控外光反射率、外腔长度以及注入电流强度等参量可以得到半导体激光器输出功率的分岔图,当参量取值对应一个输出功率时(单周期)其输出光脉冲有固定的频率和强度;对应两个时(倍周期)其输出光脉冲有两个不同强度;对应多个时为多周期或混沌状态,其输出脉冲强度在一定范围内具有随机性^[17].图2以归一化输出功率随外光反射率变化为例,显示了不同响应时间对分岔特性的影响.

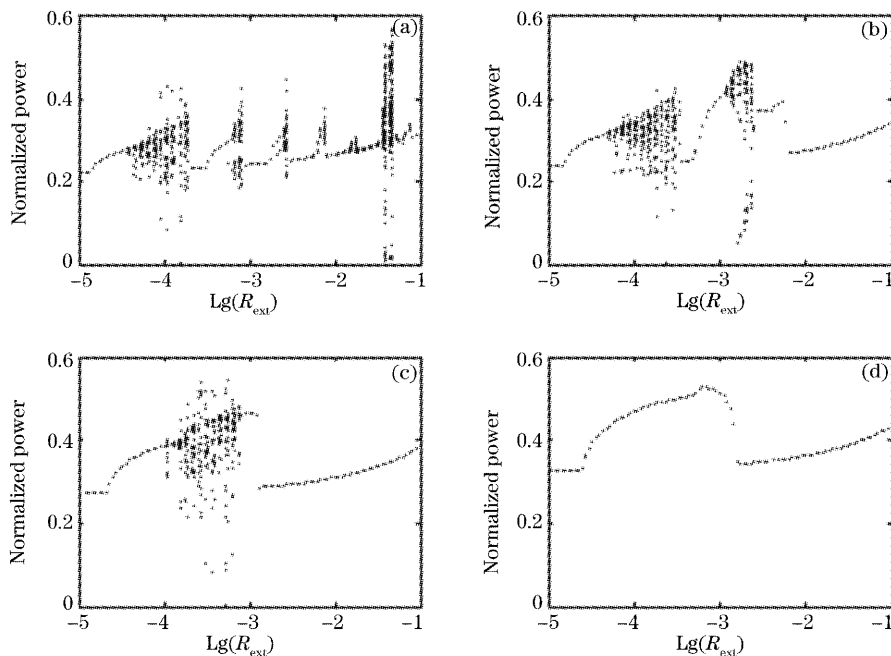


图 2 归一化输出功率随外部反射率变化的分岔图。(a)~(d) t_m 取值分别为 0.05 ns, 0.20 ns, 0.40 ns, 1.5 ns

Fig. 2 Bifurcation diagrams of normalized power versus R_{ext} for $\delta=0$, from (a) to (d) t_m takes the values 0.05 ns, 0.20 ns, 0.40 ns, 1.5 ns

观察图 2(a)发现 $t_m = 0.05$ ns, R_{ext} 从 10^{-5} 到 10^{-1} 变化,半导体激光器共经历了 6 个混沌带,中间隔有单周期或倍周期状态. $t_m = 0.20$ ns, 仅有前两

个混沌带出现, $R_{ext} > 0.02$ 后对应完全的单周期状态,如图 2(b)所示. $t_m = 0.40$ ns, 只出现一个混沌带,如图 2(c)所示. $t_m = 1.5$ ns, 所有的不稳定状态

都被抑制,输出为稳定的单周期状态。因此我们选择具有合适响应时间的相位共轭镜就可以使半导体激光器在相当大的外光反馈强度范围内实现周期性脉冲输出而不必对注入电流进行调制,如图 3 所示。

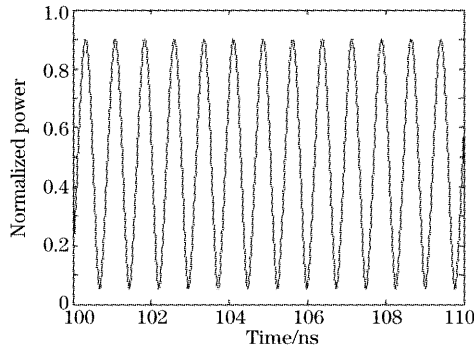


图 3 时域脉冲图

Fig. 3 Normalized power in time domain

图 4 显示了频率失调量从小到大变化时半导体激光器分岔图的变化,可以看出,随着频率失调量的增大,单周期状态逐渐被混沌化,当失调量大于 165 MHz,不论反馈量取什么值输出都不稳定,不稳定区域随反馈量的增大而增大。因此要得到稳定的脉冲输出,就应尽量减小频率失调。

通过对图 2、图 4 的分析可知,随着响应时间的增大半导体激光器的分岔图中混沌带的出现次数,出现范围得到明显的抑制,输出趋于稳定的脉冲,只是脉冲强度随反射率的变化而不同;而频率失调量增大到一定程度以后,不论外部反射率如何改变半导体激光器都处于混沌状态。以上结论与文献^[1,12,18]中的理论和实验结果取得了很好的一致。

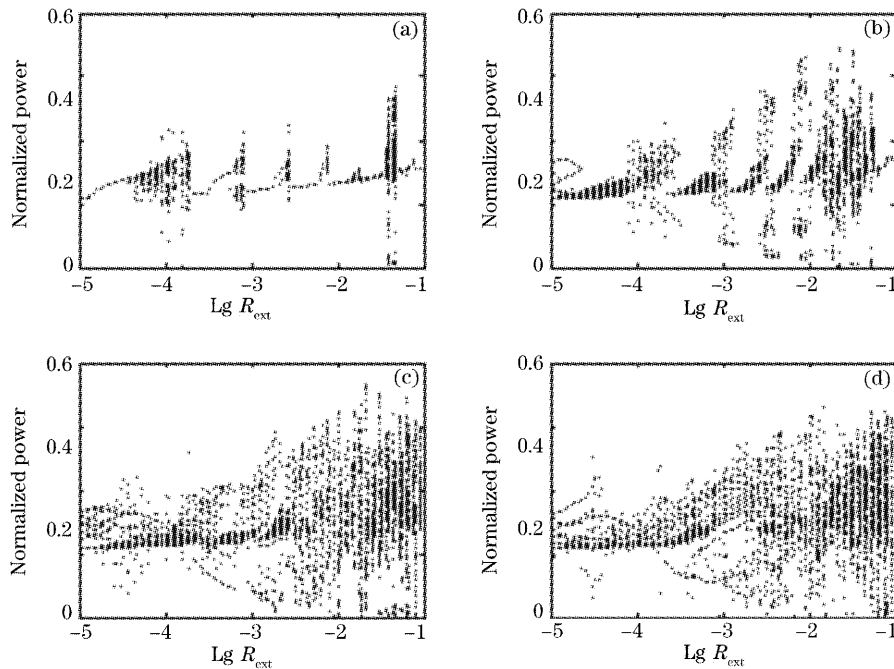


图 4 归一化输出功率随外部反射率变化的分岔图。(a)~(b) δ_m 取值分别为 0 MHz, 85 MHz, 165 MHz, 330 MHz

Fig. 4 Bifurcation diagrams of normalized power versus R_{ext} for $t_m=0.5$ ns, from (a) to (d) δ takes the values

0 MHz, 85 MHz, 165 MHz, 330 MHz

3.2 噪声特性

关于半导体激光器噪声特性的讨论,不能单考虑外光反馈一项,尤其是当外光反馈量较小时,自发辐射等噪声是占统治地位的。因此需要在(1)式、(2)式中分别引入朗之万(Langevin)形式的噪声项^[4,8]。相对强度噪声大小是噪声特性分析的一个重要参考指标,其定义如下:

$$N_{\text{RI}} = \frac{\overline{P(t)^2} - \overline{P(t)}^2}{\overline{P(t)}^2}, \quad (9)$$

其中 $P(t) = |E(t)|^2$, 表示光场强度,上划线表示取平均值。

图 5 为响应时间不同时相对强度噪声随外部反射率的变化曲线,随着反馈强度的增大每条曲线都会产生一个突变,标志着输出进入相干崩塌状态。选择 -22 dB 为突变点, t_m 取 0.05 ns, 0.2 ns 和 0.5 ns 时,曲线突变对应的反射率分别为 0.0025, 0.015 和 0.1, 也就是说 t_m 越大半导体激光器对外部反馈越不敏感。这与改变注入电流或自发辐射因

子等参量^[4]有近似等效的作用。因此在不改变工作条件的情况下,仅通过选择不同响应时间的相位共轭镜就可以控制半导体激光器的外腔灵敏度。

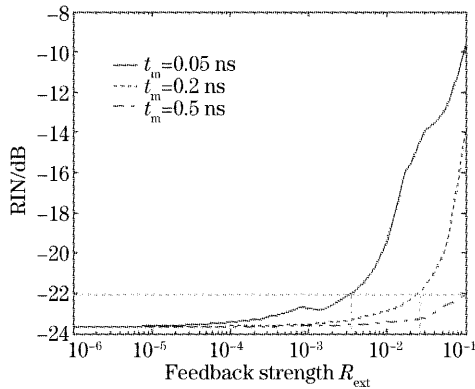


图 5 相对强度噪声随外部反射率的变化曲线

Fig. 5 RIN versus the feedback strength of PCM

图 6 为外部反射率取不同值时相对强度噪声的频谱曲线,可以看出每条曲线都有一个峰值对应弛豫

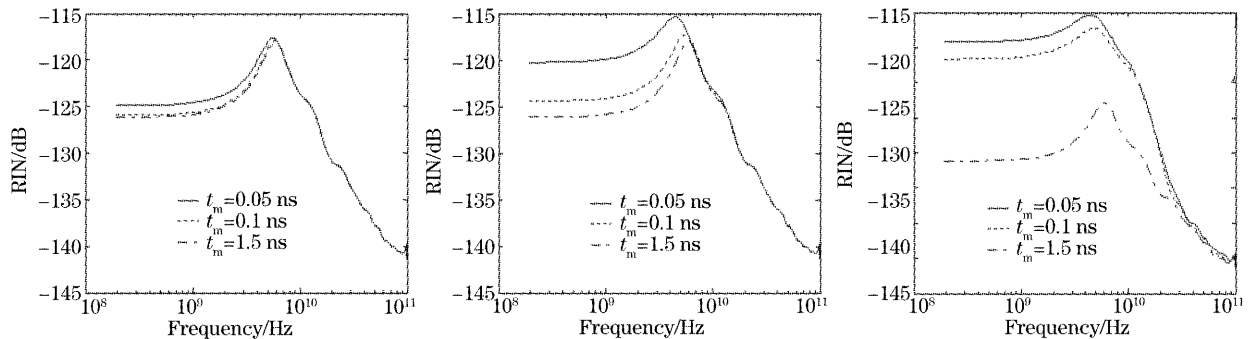


图 6 相对强度噪声频谱图。(a)~(c) R_{ext} 分别取 0.001, 0.01, 0.1

Fig. 6 Spectrum of RIN. R_{ext} takes the value of 0.001, 0.01 and 0.1 from (a)~(c), respectively

还应指出的是我们对频率失调量不为零时的噪声特性同样进行了仿真,结果发现只要失调量不超过 GHz 量级以上,它对相对强度噪声的影响几乎为零。而 GHz 量级以上的频率失调几乎是不出现的,因此以上关于噪声特性的分析同样符合频率失调的情况。

4 结 论

利用相位共轭镜作为反馈镜时,响应时间的影响是不可忽略的,本文根据所建立的非即变相位共轭光反馈条件下半导体激光器的理论模型,并利用 Simulink 进行的有效仿真,讨论了响应时间对半导体激光器动态特性的影响。分析表明:较大的响应时间可以抑制倍周期和分岔等不稳定状态,可通过选择相位共轭镜得到半导体激光器稳定脉冲输出;当噪声影响存在时,增加响应时间可使相对强度噪

振荡频率,若 R_{ext} 取值相同,随响应时间增大,峰值变小且向高频方向移动,这也与改变电流或自发辐射因子等的效果相似。由图 6 可知, t_m 从 0.05 ns 增大到 1.5 ns, $R_{\text{ext}} = 0.001$ 时,相对强度噪声的值降低 2.5 dB; $R_{\text{ext}} = 0.01$ 时,降低 6 dB; $R_{\text{ext}} = 0.1$ 时,降低 17 dB;可见反馈系数越大,增大 t_m 对相对强度噪声的抑制作用越明显。因为在低反射率时,内部噪声占主导地位,外部噪声占次要地位,而响应时间仅对外部光场产生影响,它的改变对相对强度噪声的影响就不大,高反射率时情况恰好相反。同样分析可得,低反射率时,相对强度噪声只对很短的响应时间变化敏感,对于较长的响应时间变化不敏感反射率增大后,情况相反。Lawrence 等^[19]通过实验分析相位共轭光反馈条件下半导体激光器的输出功率和噪声的频谱与本文结论一致;但由于实验中测量较困难,他们并没有讨论响应时间的影响,而这里通过建立理论模型较好地完成了非即变情况下噪声特性的讨论。

声的大小得到抑制、其频谱的峰值向高频方向移动,并且减小外腔噪声灵敏度;频率失调使输出趋于混沌化,但对相对强度噪声的影响较小。在实际中可通过改变光入射角度或相位共轭镜的厚度等方法来调控反应时间,实现对半导体激光器噪声的抑制及输出动态的控制。

参 考 文 献

- 1 Kirk Green, Bernd Krauskopf. Bifurcation analysis of a semiconductor laser subject to non-instantaneous phase-conjugate feedback[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(2): 383~393
- 2 Bruce W. Liby, David Stantman. Controlling the linewidth of a semiconductor laser with photorefractive phase conjugate feedback[J]. *IEEE Tran. Quant. Electron.*, 1996, **32**(5): 835~838
- 3 Bernd Krauskopf, George R. Gray, Daan Lenstra. Semiconductor laser with phase-conjugate feedback; Dynamics and bifurcations[J]. *Phys. Rev. E*, 1998, **58**(6): 7190~7197
- 4 L. N. Langley, K. A. Shore. Intensity noise and linewidth characteristics of laser diodes with phase conjugate optical

- feedback[J]. *IEE Proc. -Optoelectron*, 1994, **141**(2): 103~107
- 5 George R. Gray, Darid Huang, Govind P. Agrawal. Chaotic dynamics of semiconductor lasers with phase-conjugate feedback [J]. *Phys. Rev. A*, 1994, **49**(3): 2096~2105
- 6 Atsushi Murakami, Junji Ohsubo. Dynamics and linear stability analysis in semiconductor lasers with phase-conjugate feedback [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(10): 1979~1984
- 7 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis on dynamics and bifurcations characteristics of VCSELs with phase conjugate optical feedback[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 630~636 (in Chinese)
张伟利, 潘 炜, 罗 斌等. 相位共轭反馈下 VCSELs 动态分岔的理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 630~636
- 8 Lyke Petersen, Ulrik Gliese, Torben Norskov Nielsen. Phase noise reduction by self-phase locking in semiconductor lasers using phase conjugate feedback[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(11): 2526~2533
- 9 Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Fiber phase conjugation in laser diode-pumped electrooptical Q-switched laser with double-pass amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 356~359 (in Chinese)
周 涛, 陈 军, 唐 淳等. 激光二极管抽运电光调 Q 双通激光器中的光纤相位共轭[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 356~359
- 10 A. Locquet, F. Rogister, M. Sciamanna *et al.*. Synchronization of chaotic semiconductor lasers with phase-conjugate feedback [J]. *Lasers and Electro-Optics*, 2001, **2**(4): 388~389
- 11 Roy Lang, Kohroh Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser proerties[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **16**(3): 347~355
- 12 Darid H. DeTienne, George R. Gray, Govind P. Agrawal *et al.*. Semiconductor laser dynamics for feedback from a finite-penetration-depth phase-conjugate mirror[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(5): 838~844
- 13 Mark Cronin Golomb, Baruch Fischer, Jeffrey O. White *et al.*. Theory and applications of four-wave mixing in photorefractive media[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **20**(1): 12~30
- 14 Xiaofeng Li, Wei Pan, Bin Luo *et al.*. Theoretical study on controlling nonlinear behaviors of a coupled-cavity VCSEL by external optical injection[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 278~281
- 15 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis on noise sensitivity of VCSELs with external optical feedback[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(8): 896~899 (in Chinese)
张伟利, 潘 炜, 罗 斌等. 外光反馈下 VCSELs 噪声灵敏性的理论研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(8): 896~899
- 16 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Effect of wavelength dependence of reflectivity at AR-coating facets on tuning range of external-cavity semiconductor lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 975~979 (in Chinese)
潘 炜, 张晓霞, 罗 斌等. 端面反射率的波长特性对外腔半导体激光器调谐范围的影响[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 975~979
- 17 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Control of parameter switching modulation response for micro-cavity laser with distributed Bragg reflectors [J]. *J. China Institute of communications*, 2004, **25**(9): 169~174 (in Chinese)
潘 炜, 张晓霞, 罗 斌等. 微腔激光器典型参量的开关调制响应及控制[J]. *通信学报*, 2004, **25**(9): 169~174
- 18 Ole K. Andersen, Alexis P. A. Fischer, Ian C. Lane *et al.*. Experimental stability diagram of a diode laser subject to weak phase-conjugate feedback from a rubidium vapor cell[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1999, **35**(4): 577~582
- 19 J. S. Lawrence, D. M. Kane. Contrasting conventional optical and phase-conjugate feedback in laser diodes[J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **63**(3): 033805-1~033805-10