

文章编号: 0258-7025(2010)04-0939-05

# 光反馈分布反馈半导体激光器的非线性动力学 动态行为

操良平<sup>1,2</sup> 邓涛<sup>1</sup> 林晓东<sup>1</sup> 吴加贵<sup>1</sup> 夏光琼<sup>1</sup> 吴正茂<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715; <sup>2</sup> 重庆师范大学初等教育学院, 重庆 400715)

**摘要** 实验和数值模拟了外部光反馈作用下分布反馈半导体激光器(DFB-SL)的各种非线性动力学行为。实验结果表明,在不同的反馈强度下,DFB-SL 输出呈现出稳态、单周期、倍周期、多周期等多种非线性动力学动态行为。当处于一系列周期态时,激光器的输出光谱、频谱呈现强烈特征频率峰,且背景噪声极低。当外部光反馈达到一定强度后,激光器各模式发生激烈的相互作用而导致相干崩塌,激光器输出光谱、频谱演化为连续谱,并最终实验获得谱宽达 10 GHz 的宽谱混沌。对相关实验进行了数值模拟,计算结果与实验结论基本符合,均表明反馈强度是控制 DFB-SL 处于不同非线性动力学态的一个关键参量。

**关键词** 激光技术;半导体激光器;光反馈;混沌

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.0939

## Investigation on Nonlinear Dynamic Behaviors of the Distributed Feedback Semiconductor Laser Subjected to Optical Feedback

Cao Liangping<sup>1,2</sup> Deng Tao<sup>1</sup> Lin Xiaodong<sup>1</sup> Wu Jiagui<sup>1</sup>  
Xia Guangqiong<sup>1</sup> Wu Zhengmao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)  
(<sup>2</sup> Elementary Education College, Chongqing Normal University, Chongqing 400715, China)

**Abstract** Different nonlinear dynamic behaviors of the distributed feedback semiconductor laser (DFB-SL) subjected to external optical feedback have been investigated experimentally and theoretically. The experimental results show that DFB-SL can exhibit rich nonlinear dynamic behaviors such as stable state, one-period, double-period, multi-period and chaos under different feedback strengths. For the laser operating at the series of periodic states, there are obvious characteristic frequency peaks in corresponding optical spectra and power spectra while the background noise is very low. Moreover, after increasing the feedback strength to a certain level, the coherence collapse will happen due to the strong mode competition of DFB-SL, and 10 GHz broadband chaos can be obtained experimentally. In addition, the numerical simulations are executed, and the results agree well with the experimental observations. The simulations also indicate that the feedback strength is a key parameter for controlling nonlinear dynamic behaviors of DFB-SL.

**Key words** laser technique; semiconductor lasers; optical feedback; chaos

### 1 引言

近年来,半导体激光器的非线性输出特性的实用性引起人们的关注,并在一系列的应用领域得到广泛的研究。例如,基于半导体激光器的全光激光

混沌系统具有大带宽、低衰减、动力学系统复杂等特性,非常适合应用于高速远程保密通信<sup>[1,2]</sup>;基于光混沌信号的混沌雷达与传统雷达相比具有拦截度低、电磁兼容性好、抗干扰性强、带宽大等独特优势,

收稿日期: 2009-08-18; 收到修改稿日期: 2009-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(60978003)资助课题。

作者简介: 操良平(1957—),男,副教授,主要从事半导体非线性动力学方面的研究。E-mail: clp1999@163.com

\* 通信联系人。E-mail: zmwu@swu.edu.cn

正成为雷达研究的热点<sup>[3,4]</sup>。另外,半导体激光器其他的一些非线性动力学基本性质也逐渐引起人们的重视。鉴于半导体激光器的非线性特性在基础研究以及实际应用中的重要性,有必要对其进行全面系统的研究。

半导体激光器在外部扰动如光反馈、光注入、光电反馈、调制等作用下可以导致输出不稳定,产生多种非线性动力学动态输出<sup>[5~17]</sup>。其中光反馈是以半导体激光器自身的部分输出光作为扰动源,可以产生双稳、多稳、混沌等多种相关非线性动力学态<sup>[9~15]</sup>。目前,对光反馈作用下分布反馈半导体激光器(DFB-SL)的研究主要针对某一具体应用而开展,而对不同条件下 DFB-SL 的各种非线性动力学态在参数空间中的区域分布的实验研究比较少。而这种区域分布特征对详细了解和全面认识反馈 DFB-SL 的非线性动力学特性具有重要意义。另外,研究这种分布还可以为进一步专门利用或避免相关非线性动力学态提供图谱式指导。基于此,本文实验研究了 DFB-SL 在外光反馈作用下的各种非线性动力学行为,并通过光谱、射频频谱对不同反馈强度下 DFB-SL 的非线性动力学特征进行了较为系统的观察分析。同时进行了相关数值研究,绘制出输出特性随反馈光强度的动力学态分布图。模拟结果与实验基本符合。

## 2 实验装置及实验结果

### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。DFB-SL 的输出光经透镜(L)准直后,经过半波片(HWP),被偏振分束器(PBS)分成两束光。一束光经由反射镜(M)反射后耦合进激光器,实现光反馈。调节半波片与 PBS 的相对角度可以改变反馈强度的大小。另一束光经过光隔离器(OI)后直接送入监测分析系统,对 DFB-SL 输出的光谱、频谱特征进行观察、记录和分析。监测分析系统由带宽为 12 GHz 的光电探测器 PD(New Focus 1544-B)、高分辨率光谱仪 OSA(ANDO AQ6137C)、带宽为 26.5 GHz 的微波频谱分析仪(Agilent ESA E4407B)组成。该实验装置还使用了超低噪声电流源(ILX-Lightwave LDX-3620)和控制精度为正负 0.01K 的温控源(ILX-Lightwave LDT-5412),以保证 DFB-SL 工作状态的稳定性,减小电流噪声和温度漂移对实验的影响。

### 2.2 反馈强度的标定

实验中光反馈强度大小的标定主要是利用激光

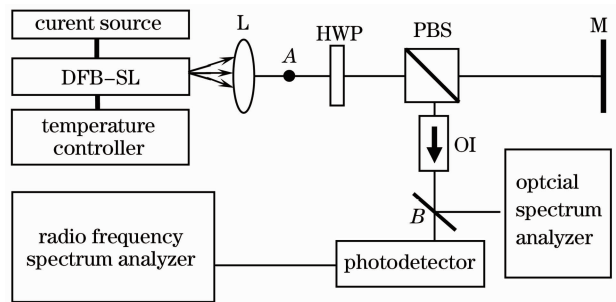


图 1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

器阈值电流与光反馈强度的关系  $I_{th}/I_{th}^{sol} = 1 - \gamma \ln(1 + \delta k/k_0)$ <sup>[16]</sup> 来确定。式中  $I_{th}$  是阈值电流,  $I_{th}^{sol}$  是无反馈时的阈值电流;  $k$  是光反馈强度, 表示图 1 中 A 点的反馈光强与激光器出射光强的分贝比;  $k_0$  是阈值下降 6.6% 时对应的反馈强度;  $\gamma$  和  $\delta$  是常数, 其值分别为 0.072 和 1.40。图 2 给出了阈值电流与反馈强度的关系。实验结果和理论曲线基本一致。

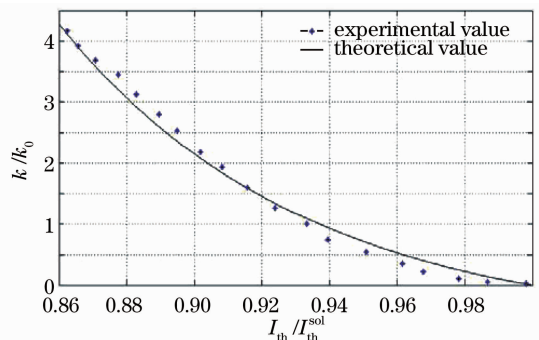


图 2 阈值电流与反馈强度的函数曲线

Fig.2 Function curve between threshold current and feedback strength

### 2.3 实验结果

实验所用的激光器是武汉光迅公司提供的 DFB-SL 芯片, 在温度为 25.7 °C 时, 阈值电流约为 12 mA。当无外部反馈时, 在 22.77 mA 的偏置电流下 DFB-SL 处于稳定的输出状态, 其中心波长为 1548.826 nm, 输出功率为 4 mW。实验中保持激光器的偏置电流和工作温度不变。当调节半波片的角度, 逐渐增大反馈光强度时, 由监测分析系统可以发现激光器输出经历了由稳态、周期态、倍周期态、多周期态到宽谱混沌态的动力学演化过程。在这个过程中, 激光光谱逐渐加宽, 功率谱中呈现的频率成分越来越多。图 3 是在反馈强度分别为 -26.7, -24.5, -22.5 和 -16.4 dB 时光谱仪、频谱仪记录的情况, 其中(a1)~(d1)为光谱, (a2)~(d2)为对应的功率谱。

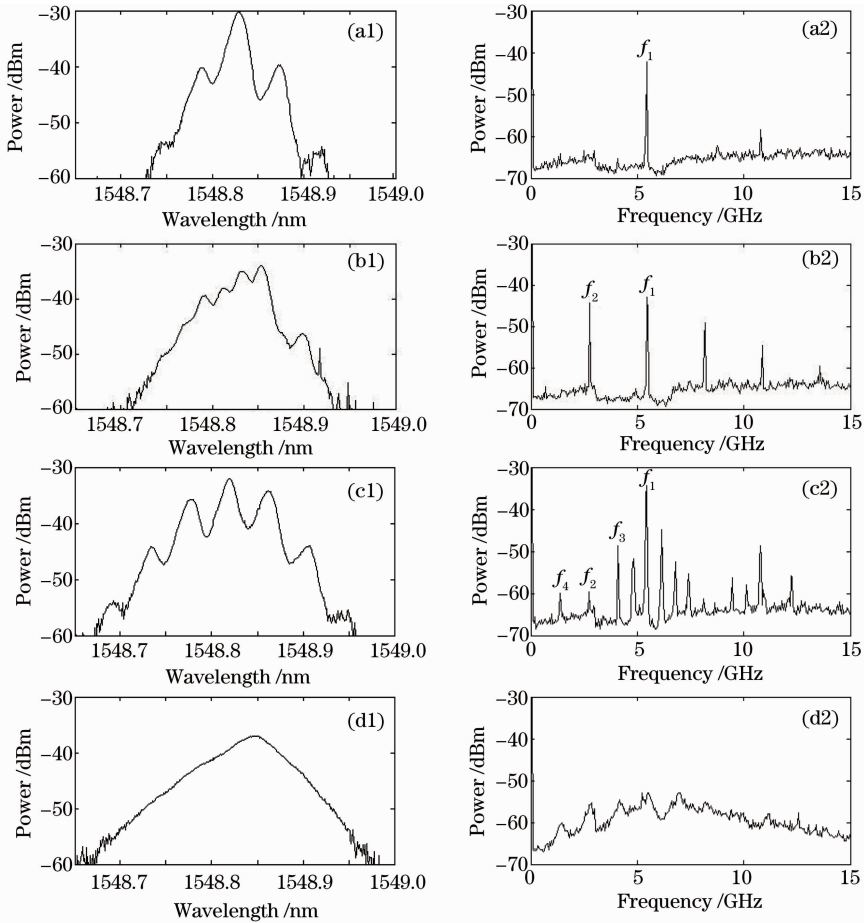


图 3 不同光反馈强度下 DFB-SL 输出的光谱和功率谱

Fig. 3 Optical spectra and power spectra of DFB-SL under different feedback strengths

在图 3(a)中,光反馈强度为 $-26.7$  dB,由于光反馈的影响,光谱呈现出 5 个峰,其功率谱在 $f_1 = 5.43$  GHz 处有一个非常强的峰,基座很小,可以明显地从噪声中显现出来。在 $f_1$ 的右侧有一个强度较小的峰,其频率 $10.77$  GHz 约等于 $2f_1$ ,是 $f_1$ 的谐波成分。这些特征说明激光器处于单周期运行状态。图 3(b)是反馈强度增大为 $-24.5$  dB 时的情况,激光器输出的光谱略有加宽,光谱呈现出更为复杂的形态,其功率谱中除 $f_1$ 外,在 $f_1$ 的左右两侧对称地出现了强度比 $f_1$ 小,频率分别为 $2.74$ 和 $8.18$  GHz 的成分。左侧 $f_2$ 约等于 $f_1/2$ ,这表明在光反馈作用下激光器的输出发生了倍周期分叉,激光器运行在倍周期输出状态。当继续增大反馈强度至 $-22.5$  dB 时[图 3(c)],光谱呈现出 7 个峰,谱宽进一步增加。功率谱中除 $f_1, f_2$ 成分之外,还包含

$f_3 = 4.09$  GHz,  $f_4 = 1.36$  GHz 等频率成分。 $f_3$ 约等于 $3f_1/4$ ,  $f_4$ 约等于 $f_1/4$ 。这些特征说明在外腔模和内腔模的相互作用下,激光输出发生了多周期分叉,激光器运行于多周期状态。当进一步增大反馈量到 $-16.4$  dB 时[图 3(d)],光谱被展宽,可以得到几乎连续变化的功率谱。这表明在激光器内部各振荡模式激烈作用下,发生了相干崩塌,激光器输出处于 $10$  GHz 的宽谱混沌状态。同时,实验中还发现,激光器呈现倍周期状态的反馈强度范围很小;当外腔较长时,很难观察到激光器处于倍周期状态。

### 3 理论分析

外光反馈半导体激光器的动力学行为可由下列包含反馈项和朗之万(Langevin)噪声项的单模速率方程<sup>[17]</sup>来描述

$$\frac{dS(t)}{dt} = \left\{ IG[N(t), S(t)] - \frac{1}{\tau_p} \right\} S(t) + \frac{IBN(t)}{\tau_e} + 2 \frac{\kappa}{\tau_{in}} \sqrt{S(t)S(t-\tau)} \cos[\theta(t)] + F_S(t), \quad (1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N(t)}{\tau_c} - G[N(t), S(t)]S(t) + F_N(t), \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha \left\{ \Gamma G[N(t), S(t)] - \frac{1}{\tau_p} \right\} - \frac{\kappa}{\tau_{in}} \sqrt{\frac{S(t-\tau)}{S(t)}} \sin[\theta(t)] + F_\Phi(t), \quad (3)$$

$$G[N(t), S(t)] = \frac{G_N[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon S(t)}, \theta(t) = \omega_0 \tau + \phi(t) - \phi(t - \tau), \quad (4)$$

式中  $G_N$  为微分增益;  $N_0$  为透明载流子数;  $F_S(t)$ ,  $F_N(t)$ ,  $F_\Phi(t)$  为 Langevin 噪声项;  $\kappa$  为反馈光与输出端面处内反射光的电场幅度之比, 反馈强度  $k$  正比于  $\kappa^2$ ;  $N$  和  $S$  分别是激光腔内载流子数和光子数;  $\omega_0$  为激光器自由运行时的频率;  $\Phi$  为相位;  $e$  为电子电量;  $\tau_c$  为载流子寿命;  $\tau_p$  为光子寿命;  $\tau_{in}$  为光在激光腔内的往返时间;  $\tau$  为光在外腔的往返时间;  $\Gamma$  为限制因子;  $\epsilon$  为增益饱和系数;  $\alpha$  为线宽增强因子;  $\beta$  为自发辐射因子。

方程(1)~(3)可采用4阶龙格-库塔算法数值求解, 各参数取值为:  $G_N = 3.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ,  $N_0 = 1.36 \times 10^8$ ,  $\alpha = 4.5$ ,  $\tau_c = 2 \text{ ns}$ ;  $\tau_p = 2 \text{ ps}$ ,  $\Gamma = 0.5$ ,  $\epsilon = 7.5 \times 10^{-8}$ ,  $\beta = 1 \times 10^{-5}$ ,  $I = 22.77 \text{ mA}$ 。图4给出了反馈强度分别为  $-26.7$ ,  $-24.5$ ,  $-22.5$  和

$-16.4 \text{ dB}$ 时激光器输出的时间序列、相图及相应的功率谱。从图中可以看出, 随着反馈强度的增加, 激光器输出逐渐从周期态、倍周期态、多周期态向宽谱混沌态发生演化。从图4(a)可以看出, 激光器功率谱中呈现出频率  $f_1 = 5.43 \text{ GHz}$  的单峰, 其谐波频率(频率正好等于  $2f_1$ ) 的强度相对较小, 表明激光器处于周期态。图4(b)的功率谱中除  $f_1$  频率成分外, 还包含了  $f_2 = f_1/2$  频率成分, 表明激光器处于倍周期态。图4(c)的功率谱中不仅有  $f_1$  和  $f_2$  的频率成分, 还包含了  $f_3 = 3f_1/4$ ,  $f_4 = f_1/4$  等频率成分, 表明激光器处于多周期态。图4(d)给出了几乎连续的功率谱, 表明激光器已经进入了宽谱混沌态。以上理论结果与实验基本符合。

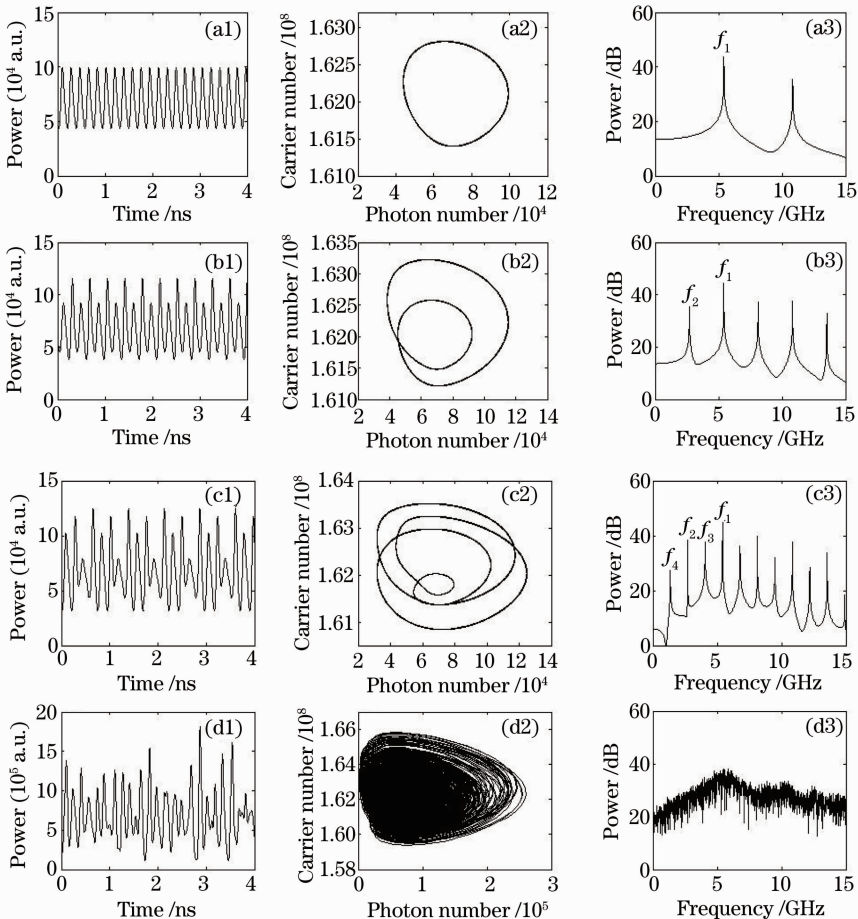


图4 系统在不同反馈强度下的动力学状态

Fig. 4 Dynamic behaviors of DFB-SL under different feedback strengths

为了更好地描述 DFB-SL 各非线性动力学态在参数空间中的分布,图 5 给出了 DFB-SL 随反馈光强变化的分叉图。由图 5 可知,当反馈强度小于  $-34.05$  dB 时,由于反馈扰动较小,还不足以改变激光器的动力学状态,系统处于稳态;当反馈强度为  $-34.05 \sim -25.67$  dB 时,在外反馈扰动作用下,激光器输出处于单周期态;当反馈强度为  $-25.67 \sim -24.15$  dB 时,外腔模和内腔模相互作用发生倍周期分叉,激光器运行于倍周期状态;当反馈强度从  $-24.15$  dB 逐渐增大时,激光各模式之间发生激烈的相互作用,分叉逐渐增多,最后系统的周期性受到破坏,发生相干崩塌,激光器运行从多周期状态逐步演化进入混沌态。因此,反馈强度是使 DFB-SL 处于不同非线性动力学态的一个关键参量,在实际应用中可以通过有目的地控制反馈强度使 DFB-SL 处于所需的非线性动力学态。

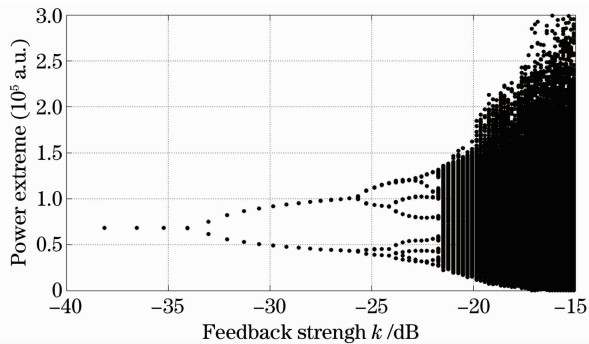


图 5 激光器输出随光反馈强度变化的分叉图

Fig. 5 Bifurcation diagram of DFB-SL output with the change of feedback strength

## 4 结 论

实验和理论研究了光反馈作用下 DFB-SL 的非线性动力学特性。通过光谱、频谱分析了 DFB-SL 多种典型的非线性动力学行为。实验表明,在一定的外反馈强度范围内,DFB-SL 随外反馈量的逐渐增大,将由稳态历经单周期、倍周期、多周期,最终进入连续宽谱的混沌状态。希望本文的工作能有助于人们进一步了解光反馈下 DFB-SL 的非线性动力学特征并开展相关应用技术的开发。

## 参 考 文 献

- 1 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**: 343~346
- 2 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Chaos synchronization in polarization selective mutually coupled semiconductor lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 55~60
- 3 F. Y. Lin, J. M. Liu. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 815~820
- 4 F. Y. Lin, J. M. Liu. Diverse waveform generation using semiconductor for radar and microwave applications[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6): 682~689
- 5 F. Y. Lin, J. M. Liu. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(4): 562~568
- 6 Kong Huijun, Wu Zhengmao, Wu Jiagui *et al.*. Experimental investigation on the nonlinear dynamical characteristics of distributed feedback semiconductor lasers subjected to external optical injection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1490~1495
- 7 孔慧君,吴正茂,吴加贵等. 外部光注入分布反馈激光器的非线性动力学特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1490~1495
- 8 G. Q. Xia, Z. M. Wu, X. H. Jia. Theoretical investigation on commanding the bistability and selfpulsation of bistable semiconductor laser diode using delayed optoelectronic feedback [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4296~4304
- 9 G. Q. Xia, S. C. Chan, J. M. Liu. Multistability in a semiconductor laser with optoelectronic feedback [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(2): 572~576
- 10 H. Olesen, J. H. Osmudsen, B. Tromborg. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(6): 762~773
- 11 N. Kikchi, Y. Liu, J. Ohtsubo. Chaos control and noise suppression in external-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1): 56~65
- 12 Kong Lingqin, Wang Anbang, Wang Haihong *et al.*. Dynamics of semiconductor laser with optical feedback: Evolution from low-frequency fluctuations to chaos[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4): 2266~2272
- 13 孔令琴,王安帮,王海红等. 光反馈半导体激光器产生低频起伏与高维混沌信号及其演化过程[J]. *物理学报*, 2008, **57**(4): 2266~2272
- 14 Yan Senlin. Control of chaos in an external cavity delay feedback semiconductor laser via modulating the polarizing light[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6878~6882
- 15 颜森林. 外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振可控方法研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(11): 6878~6882
- 16 Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser with multiple external optical feedbacks[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1450~1454
- 17 李孝峰,潘伟,罗斌等. 多次外光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1450~1454
- 18 Yan Senlin. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 996~1001
- 19 颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 996~1001
- 20 Yan Senlin. Controlling chaos in semiconductor lasers by phase conjugation feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1043~1046
- 21 颜森林. 半导体激光器混沌相位共轭反馈控制方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1043~1046
- 22 N. A. Olsson, N. K. Dutta. Effect of external optical feedback on the spectral properties of cleaved-coupled-cavity semiconductor lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**(9): 840~842
- 23 L. N. Langley, K. A. Shore. The effect of external optical feedback on timing jitter in modulated laser diodes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(3): 434~441