

文章编号: 0258-7025(2006)08-1043-04

# 半导体激光器混沌相位共轭反馈控制方法

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 江苏 南京 210017)

**摘要** 提出了半导体激光器混沌相位共轭反馈(PCF)控制方法,建立了相位共轭反馈控制条件下激光器电流激发混沌的物理模型,发现其混沌控制物理机制是相位共轭反馈影响改变了激光器非线性增益和线宽增强因子特性,控制了系统的动力学行为及频率特性,其影响程度与反馈系数、延迟时间和光线宽增强因子等有关。数值模拟结果表明,在不同强度的光反馈下,通过调节相位共轭反馈光的延迟时间可以控制混沌激光到周期态、双周期态、多周期态等;发现相位共轭反馈控制特点是反馈光场和输出激光处于相干增强状态去实现混沌控制,且能控制实现激光器功率增强的周期脉冲输出。

**关键词** 激光技术;混沌;控制;相位共轭反馈;周期

**中图分类号** O 415.5 **文献标识码** A

## Controlling Chaos in Semiconductor Lasers by Phase Conjugation Feedback

YAN Sen-lin

(Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing, Jiangsu 210017, China)

**Abstract** A method of controlling chaos is presented by phase conjugation feedback (PCF) in a semiconductor laser. The physical model of controlling chaos produced by modulating the current of semiconductor laser is set up under the condition of PCF. The physical mechanism is found that the nonlinear gain coefficient and linewidth enhancement factor of laser are affected by PCF, the system dynamical behavior and its frequency characterization can be changed and controlled. The effect quantity relates to the feedback coefficient, the delay time and the linewidth enhancement factor. Numerical simulations show that chaos is controlled into the periodic state, the dual-periodic state, the multi-periodic state respectively by controlling PCF light delay time under the conditions of different PCF light intensity. And the laser emitting power is increased by PCF when chaos are controlled in all kinds of periodic states because that the performance characterization of the PCF light can produce the coherent function on the laser emitting light to realize controlling chaos in PCF controlling chaos processes.

**Key words** laser technique; chaos; controlling; phase conjugation feedback; period

## 1 引 言

混沌具有对初值的敏感特性和随机变化特点<sup>[1~5]</sup>,人们总是期望找到一些方法来控制混沌,使其实现对混沌系统中某个不稳定周期轨道的稳定控制或使其保持在某个希望的平衡态上<sup>[6~9]</sup>。20 世纪 90 年代,OGY<sup>[1]</sup>方法提出后,混沌控制方法迅速发展,实现了对各种混沌系统及包括激光混沌系统的控制<sup>[6~9]</sup>。

近年来,相位共轭反馈(PCF)技术引起了人们的极大兴趣<sup>[10~12]</sup>,这种光学反馈不同于普通的平面反馈,反馈光是输出光的时间反演波,在沿原路径返回时,能补偿传输路径上的相位畸变,能改善光束质量等特点。

本文把相位共轭反馈技术应用于激光混沌控制,研究电流调制半导体激光器的混沌相位共轭反馈控制方法。

**收稿日期**:2005-12-13; **收到修改稿日期**:2006-02-20

**基金项目**:江苏省教育厅(04KJD520084,02KJD510019)资助项目。

**作者简介**:颜森林(1962—),男,江苏淮安人,南京晓庄学院副教授,博士后,主要从事光纤通信系统与技术、光保密通信、光电子器件和激光混沌等方面的研究。E-mail:senlinyan@163.com 或 yansenlinbsh@sina.com

## 2 模 型

电流调制半导体激光器在大电流高频调制时会呈现出分岔、混沌等许多复杂的动力学状态,其激光动力学方程为<sup>[6~10]</sup>

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}(G - \gamma_p)A, \quad (1a)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p), \quad (1b)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I[1 + m\sin(2\pi f)]}{q} - \gamma_e N - GV_p A^2, \quad (1c)$$

式中  $A$  和  $\Phi$  分别为激光振幅和相位;  $N$  为激光器载流子数;  $G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th}) / \sqrt{1 + A^2/A_s^2}$  为模式增益,  $v_g$  为光子群速度,  $a$  为增益常数,  $\Gamma = V/V_p$  为压缩和限制因子,  $V$  为腔体积,  $V_p$  为激光模式体积,  $A_s$  为饱和光子场强,  $N_{th} = n_{th}V$  为激光透明时的载流子数,  $n_{th}$  为它的密度值;  $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$  为光子损耗速率,  $\alpha_m$  为腔光子损耗,  $\alpha_{int}$  为内部光子损耗;  $I$  为驱动电流;  $q$  为单位电荷;  $\beta_c$  为光线宽增强因子;  $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$  为载流子非线性损耗速率,  $A_{nr}$  为非辐射复合速率,  $B$  为辐射复合因子,  $C$  为俄歇复合因子;  $m$  为电流调制深度;  $f$  为调制频率。

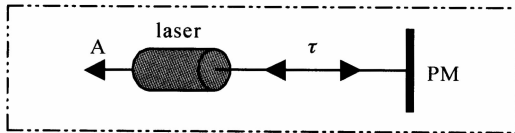


图 1 半导体激光器混沌相位共轭反馈控制模块

Fig.1 Schematic block of controlling chaotic laser via phase conjugation feedback, where PM is the phase conjugation feedback mirror

相位共轭反馈控制模块如图 1 所示,  $\tau$  为反馈时间。由于反馈光是输出光的时间反演波,在沿原路径返回时,净相位积累是零<sup>[7,8]</sup>。此时,受控方程是在式(1a)和(1b)的右边分别再加上振幅和相位控制项

$$\frac{k}{\tau_L}A(t - \tau)\cos[\Phi(t - \tau) + \Phi(t)], \quad (2a)$$

$$\Delta\omega - \frac{k}{\tau_L} \frac{A(t - \tau)}{A(t)}\sin[\Phi(t - \tau) + \Phi(t)], \quad (2b)$$

式中  $k$  为反馈系数;  $\tau_L = 2n_g L/c$  为光在激光器腔长  $L$  内来回一周的时间,  $c$  为真空中的光速,  $n_g = c/v_g$  为激光器群速折射率;  $\Delta\omega$  为原激光频率与有相位共轭反馈时的频率失谐。由(1)和(2)式得到控制系统

的稳态解

$$G - \gamma_p = -\frac{2k}{\tau_L}\cos(2\Phi), \quad (3a)$$

$$\beta_c(G - \gamma_p) = -2\Delta\omega + \frac{2k}{\tau_L}\sin(2\Phi), \quad (3b)$$

及频率失谐

$$\Delta\omega = \frac{2k}{\tau_L}[\beta_c\cos(2\Phi) + \sin(2\Phi)], \quad (3c)$$

可见,在相位共轭反馈时,增益和线宽增强因子都要受到相位共轭反馈光的影响,其影响程度与反馈系数、延迟时间和光线宽增强因子等有关,系统的动力学特性及频率特性也将随着发生变化,这就是相位共轭反馈控制激光混沌方法的物理机制。而一般延迟反馈激光混沌控制方法的物理机制是利用反馈光场处于相干减弱状态来实现混沌控制的<sup>[7~9]</sup>。相位共轭反馈激光混沌控制方法则是利用反馈光场处于相干增强状态来实现混沌控制的,能实现激光输出功率增强的周期控制。

## 3 数值结果

图 2 是大电流高频调制时激光器输出光的数值结果,图 2(a)和(b)分别是典型的混沌波变化和吸引子(激光器参数见表 1),其中调制深度  $m = 0.5$ , 调制频率  $f = 1.25$  GHz, 输出光功率  $P$  为 1.32 mW。

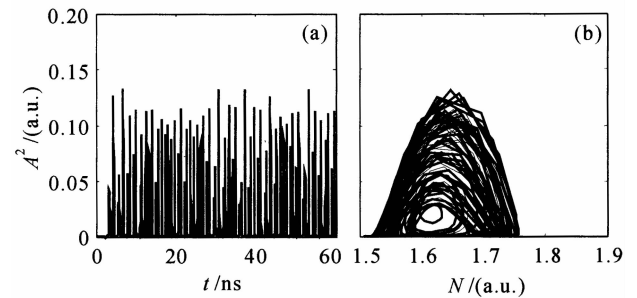


图 2 激光混沌波形(a)及吸引子相图(b)

Fig.2 Chaotic laser waveform (a) and phase diagram of attractor (b)

根据相位共轭反馈激光混沌控制方法,如适当调节延迟反馈时间  $\tau$  以及反馈强度时,混沌可以被控制到周期态。

图 3 是双极限环相图 ( $A^2$  和  $N$  构成的相空间),混沌已被控制到双周期态,还发现当  $\tau$  在 0.3516~0.3522 ns 时,混沌都可以被控制到双周期态或准双周期态。

表 1 激光器参数

Table 1 Laser parameters

Parameter	Symbol	Value	Parameter	Symbol	Value
Active cavity length / $\mu\text{m}$	$L$	350	Nonradiative recombination rate / $\text{s}^{-1}$	$A_{\text{nr}}$	$1.0 \times 10^8$
Active cavity width / $\mu\text{m}$	$w$	2	Radiative recombination coefficient / $(\text{cm}^3/\text{s})$	$B$	$1.2 \times 10^{-10}$
Active cavity thickness / $\mu\text{m}$	$d$	0.15	Auger recombination coefficient / $(\text{cm}^6/\text{s})$	$C$	$3.5 \times 10^{-29}$
Mode confinement factor	$\Gamma$	0.29	Amplitude at saturation / $\text{m}^{-3/2}$	$A_s$	$1.6619 \times 10^{11}$
Group refractive index	$n_g$	3.8	Gain constant / $\text{cm}^2$	$a$	$2.3 \times 10^{-16}$
Cavity loss / $\text{cm}^{-1}$	$\alpha_m$	29	Linewidth enhancement factor	$\beta_c$	6
Internal loss / $\text{cm}^{-1}$	$\alpha_{\text{int}}$	20	Drive current / $\text{mA}$	$I$	20
Carrier density at transparency / $\text{cm}^{-3}$	$n_{\text{th}}$	$1.2 \times 10^{18}$	Detuning / $\text{rad}$	$\Delta\omega$	0

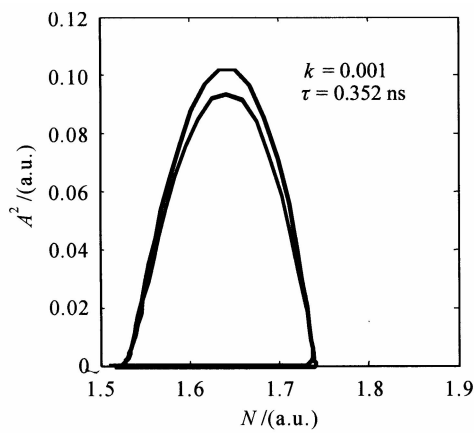


图 3 混沌被控制到双周期态

Fig. 3 Chaos into a dual-periodic state

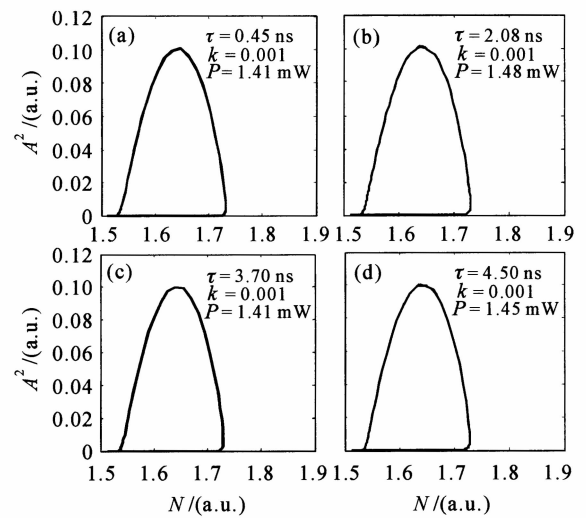


图 5 混沌被控制到不同周期态

Fig. 5 Chaos into different periodic states

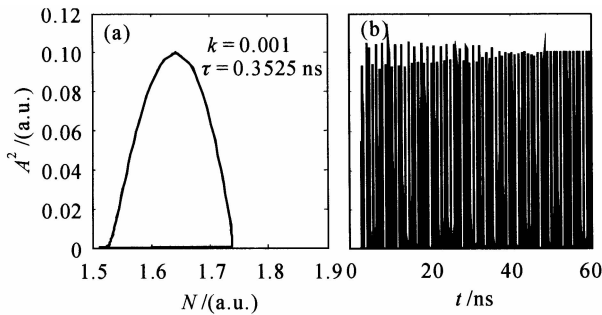


图 4 混沌被控制到周期态(极限环)的过程

Fig. 4 Procession of chaos into period (limiting cycles)

图 4 是当  $\tau = 0.3525 \text{ ns}$  时混沌的周期控制,图 4(a)是极限环,图 4(b)是混沌被控制到周期态(极限环)的过程,控制后的激光输出功率  $P$  为  $1.51 \text{ mW}$ 。

图 5 是在不同  $\tau$  时的混沌周期控制,显现出不同相轨迹的极限环,说明激光混沌已被控制到周期态,同时激光输出功率变大,即相位共轭反馈混沌控制实现了激光输出功率增强的周期控制。还发现当  $\tau$  分别在  $0.40 \sim 0.56 \text{ ns}$ ,  $2.025 \sim 2.100 \text{ ns}$  以及  $2.8$

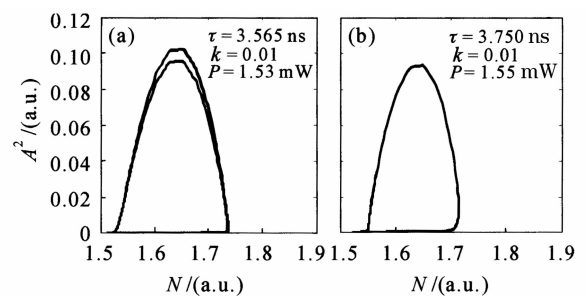


图 6 控制到不同的双周期态(a)及周期态(b)

Fig. 6 Chaos into different dual-periodic states (a) and periodic states (b)

$\sim 2.9 \text{ ns}$  时都能控制混沌到周期态。

图 6 是当  $k = 0.01$  时混沌被分别控制到双周期态和周期态的相图。图 7 是  $k = 0.1$  时混沌被分别控制到双周期态和多周期态的相图。显然由于相位共轭反馈强度增强,激光输出功率变大了。

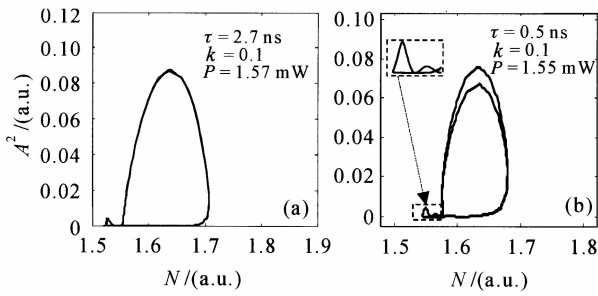


图 7 混沌被分别控制到另一个双周期态(a)和多周期态(b)

Fig. 7 Chaos into other dual-periodic state (a) and multi-periodic states (b)

## 4 结 论

提出激光器混沌相位共轭反馈控制方法,能把混沌控制到周期态以及多周期态上,由于相位共轭反馈,激光输出功率增加了,该控制方法对激光混沌控制研究是有益的。

### 参 考 文 献

- 1 E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke. Controlling chaos [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(11):1196~1199
- 2 Tan Zhongwei, Liu Yan, Fu Yongjun *et al.*. Analysis of chaotic phenomena in the fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(4):311~314  
谭中伟,刘 艳,傅永军等. 光纤激光器的混沌现象分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4):311~314
- 3 Zhuang Jun, Tan Weihai. Unstability and chaos of a detuned two-mode homogeneously broadened laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(9):1185~1188  
庄 军,谭维翰. 双模含失谐均匀加宽激光的不稳定性与混沌[J]. *光学学报*, 1995, **15**(9):1185~1188
- 4 Luo Ligu, Nie Dezhen. Chaos behaviours in dual coupled class-B laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(12):1735~1737  
罗利国,聂得真. 双耦合B类激光器的混沌动力学行为[J]. *光学学报*, 1995, **15**(12):1735~1737
- 5 Wu Liang, Zhu Shiqun. Communications using multi-mode laser system based on chaotic synchronization [J]. *Chinese Physics*, 2003, **12**(3):300~304
- 6 Yan Senlin, He Longqing, Wu Haiyong *et al.*. Studies on method of phase-shift controlling chaos for dual-ring erbium-doped fiber lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):642~646  
颜森林,何龙庆,吴海勇等. 双环掺铒光纤激光器混沌相移控制方法研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):642~646
- 7 Noriyuki Kikuchi, Yun Liu, Junji Ohtsubo. Chaos control and noise suppression in external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1):56~65
- 8 A. T. Ryan, G. P. Agrawal, G. R. Gray *et al.*. Optical-feedback-induced chaos and its control in multimode semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(3):668~679
- 9 Zhang Tao, Lu Wei. Acousto optical bistable system chaos control via periodic signal disturb parameter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4):456~459  
张 涛,路 巍. 声光双稳态系统混沌的周期扰动控制[J]. *光子学报*, 2004, **33**(4):456~459
- 10 Senlin Yan. All-optical chaotic MQW laser repeater for long-haul chaotic communications [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5):283~286
- 11 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis on dynamics and bifurcations characteristics of VCSELs with phase conjugate optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):633~636  
张伟利,潘 炜,罗 斌等. 相位共轭反馈下垂直腔面发射激光器动态分岔特性的理论研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):633~636
- 12 Gao Xiaoming, Zhang Weijun, Han Yanong. Chaotic dynamics of semiconductor laser with phase conjugation feedback [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 1998, **15**(3):253~257  
高晓明,张为俊,韩亚农. 相位共轭反馈半导体激光器混沌动力学[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(3):253~257