

# 半导体激光器混沌光电延时负反馈 控制方法研究\*

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2007 年 3 月 5 日收到, 2007 年 9 月 3 日收到修改稿)

提出半导体激光器混沌光电延时反馈控制方法. 通过附加一个光电延时电路控制系统, 建立了三个有光电延时反馈条件下的注入激光混沌控制物理模型. 进行了有控制时的最大 Lyapunov 指数分析. 数字仿真发现, 当调节延时时间和反馈光电流时, 能控制激光混沌到 3 周期态、5 周期态等; 当周期键控光电流时, 能控制激光混沌到 8 周期态、9 周期态等. 最后, 通过组合应用光电延时反馈控制电路系统与附加周期调制驱动电流时, 能有效地控制激光混沌到单周期态以及其他周期态.

关键词: 混沌, 控制, 激光器, 光电转换

PACC: 0545, 4255P, 4260

## 1. 引 言

混沌是自然界普遍存在的一种现象, 其基本特性是它对初值条件极为敏感, 具有随机变化特点, 它的长期行为是难以预测的. 混沌表面上虽然呈现无规律特性, 但其背后隐藏着有序的本质特点也逐渐被人们所发现<sup>[1-2]</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>[3-5]</sup>. 20 世纪 90 年代, Ott, Grebogi 和 York<sup>[1]</sup>提出 OGY 方法后, 混沌控制方法得到了迅速发展<sup>[3-5]</sup>. 其中半导体激光器混沌控制主要有全光的光反馈方法、光相位调制方法、注入周期信号方法以及全电的驱动电流周期扰动方法等<sup>[6-10]</sup>, 其主要物理机制是分别利用光的相干性和电流周期激发控制混沌.

在光通信以及光器件应用中, 激光注入一直受到人们的重视. 例如, 由于光注入, 可稳定激光器工作状态、能减小噪声增加调制带宽或进行波长转换等等<sup>[7,8]</sup>. 然而, 在全光通信中, 由于很难完全隔离外部光进入激光器, 其很小量的外部注入光都能引起激光器工作不稳定. 另外, 随着激光注入强度的增

加, 激光的动力学行为会变得非常复杂, 会出现分岔、双周期和混沌等现象<sup>[11-14]</sup>. 本文着重考虑光电组合控制激光混沌方法, 主要研究外部光注入半导体激光器混沌光电延时负反馈控制方法.

## 2. 模 型

为了能有效地控制注入激光混沌系统, 设计出光电负反馈外部控制电路系统, 如图 1 所示, 其中光检测器把输入激光转换成光电流, 延时时间控制器控制延时时间, 放大器对光电流进行控制放大. 这样, 有控制的激光动力学方程为<sup>[8-10]</sup>

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}(G - \gamma_p)E + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(\phi), \quad (1a)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E} \sin(-\phi) - \Delta\omega_m, \quad (1b)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{[1 - \rho E^2(t - \tau)]E_0^2}{q} - \gamma_e N - GV_p E^2. \quad (1c)$$

这里  $E$  和  $\phi$  是激光振幅和相位;  $N$  是激光器载流子数;  $\tau$  是延时时间;  $E^2$  是激光强度;  $E_0^2$  是未控制时

\* 江苏省教育厅科研计划(批准号 06KJ140111)资助的课题

激光输出平均强度； $\rho$  是光电流放大控制系数； $-\rho E^2(t - \tau)E_u^2$  是控制项，该控制方法是改变光电流放大控制系数的连续反馈控制；

$$G = (\Gamma v_g a / V)(N - N_{th}) \sqrt{1 + E^2 / E_s^2}$$

是模式增益，其中  $v_g$  是激光腔内光子的群速度， $a$  是增益常数， $\Gamma = V / V_p$  是压缩和限制因子， $V$  是激光腔体积， $V_p$  是激光模式体积， $E_s$  是饱和光子场强； $N_{th} = n_{th} V$  是激光透明时的载流子数， $n_{th}$  是它的密度值； $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{im})$  是光子损耗速率，其中  $\alpha_m$  是腔光子损耗， $\alpha_{im}$  是内部光子损耗； $\Delta\omega_m$  是注入频差； $\tau_L = 2n_g L / c$  是光在激光腔长  $L$  内来回一周的时间，其中  $c$  是真空中光速， $n_g = c / v_g$  是群速折射率； $I$  是驱动电流； $q$  是单位电荷； $\beta_c$  是光线宽增强因子； $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)$  是载流子非线性损耗速率，其中  $A_{nr}$  是非辐射复合速率， $B$  是辐射复合因子， $C$  是俄歇复合因子； $k$  是光注入指数。由于延时反馈控制项的出现，原来的激光三维动力学系统，现被改变成为无限维激光动力学系统，激光的动力学行为必然要随着控制参数的变化而发生改变和调整，其反馈的光电流强度和延时时间将影响系统的动力学状态。

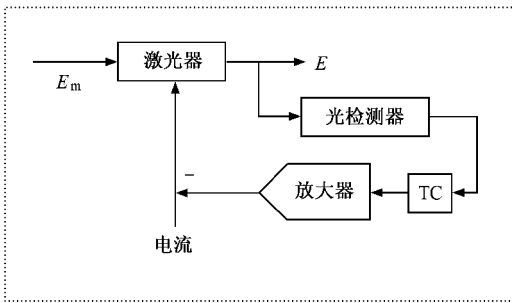


图1 光电延时负反馈激光混沌控制模块 TC 是延时时间控制器

本文还给出最大 Lyapunov 指数以印证有控制时的系统动力学行为，最大 Lyapunov 指数乃是相邻轨线发散率的测度。具体计算方法按流程(图2)进行<sup>[15]</sup>。把有控制的系统作为演化方程，然后对演化方程进行 Jacobi 线性化处理，可得由 Jacobi 矩阵所决定的延时的  $\delta x$  方程(变量  $\delta x$  表示相邻轨线发散，而  $x(t) = (E, \phi, N)$ )。  $\delta x$  方程中的  $E(t - \tau)$  延时项仍由演化方程联立给出，这样可联立延时的演化方程去数值求解延时的  $\delta x$  方程，在求解  $\delta x$  方程每一步过程中都要对它的变量进行取模(表示相邻

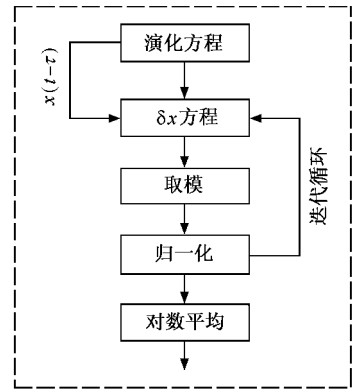


图2 计算流程模块

轨线发散长度)。为了防止计算过程中数值发散，还需再对变量模归一化，依次迭代循环。最后，对得到的所有归一化模值分别取对数且按迭代循环次数取平均，即算出最大 Lyapunov 指数  $L_{max}$ 。如  $L_{max} < 0$ ，表示轨线在每个方向上都是收缩的，即系统将被控制到稳定态，如  $L_{max} = 0$ ，表示沿极限环方向的轨线长度不辐射也不收敛，则系统有可能被控制到周期态或者多周期态。 $\delta x$  方程可表示如下：

$$\frac{d}{dt} \delta x = \mathcal{K}(x) \delta x + \delta C(t - \tau), \quad (2)$$

式中  $x(t) = (E, \phi, N)$  Jacobi 矩阵为

$$\mathcal{K}(x) = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

其中

$$A_{11} = \frac{1}{2}(G - \gamma + EG_E),$$

$$A_{12} = \frac{k}{\tau_L} E_m \sin(-\phi),$$

$$A_{13} = \frac{1}{2} EG_N,$$

$$A_{21} = \frac{1}{2} \beta_c G_E - \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E^2} \sin(-\phi),$$

$$A_{22} = -\frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E} \cos(\phi),$$

$$A_{23} = \frac{1}{2} \beta_c G_N,$$

$$A_{31} = -2GEV_p - E^2 V_p G_E,$$

$$A_{32} = 0,$$

$$A_{33} = M_m(t - \tau) - \gamma_e - N\gamma_{eN} - E^2 V_p G_N,$$

$$G_N = \frac{\partial G}{\partial N},$$

$$G_E = \frac{\partial G}{\partial E},$$

$$\gamma_{eN} = \frac{\partial \gamma_e}{\partial N}.$$

而  $M_m(t - \tau)$  和  $\delta C(t - \tau)$  的具体形式将分别由 (1c) 式以及下面给出的控制方程决定. 在控制系统 (1) 中取

$$M_m = 0,$$

$$\delta C(t - \tau) = (I/q) \int 2\rho E(t - \tau) \times \delta E(t - \tau) E_u^2 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

### 3. 控制及数值结果

#### 3.1. 光电延时控制及数值结果

激光混沌光电延时控制方法的具体实现手段是延时时间控制器控制延时时间, 放大器控制反馈光电流强度. 控制系统 (1) 的数值结果如图 3—图 8 所示.

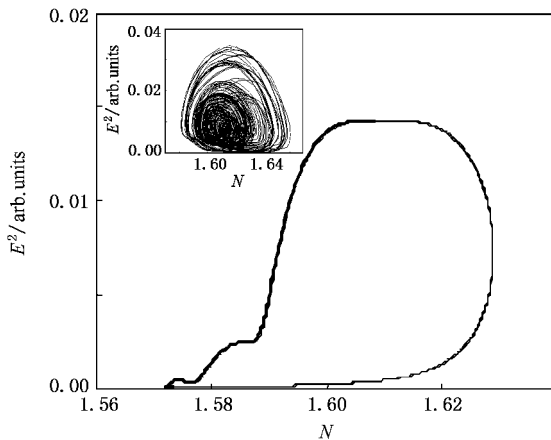


图 3 当  $\rho = 0.2$  和  $\tau = 1 \text{ ns}$  时, 混沌被控制到 3 周期态. 内插图为激光混沌吸引子

当  $\rho = 0.2$  和  $\tau = 1 \text{ ns}$  及  $E_u = 0.00792 E_s$  时, 激光器的其他参量取值列于表 1 中, 控制结果如图 3 所示. 从图 3 可以看到, 混沌已被控制到 3 周期态, 其中  $L_{\max} \approx \alpha$  (3 周期态出现前过程已忽略). 当放大控制系数取值为  $\rho = 0.3$  时, 则  $L_{\max} \approx 0$ , 图 4 是系统 (1) 被控制到 10 周期态的相图, 有 5 个明显的周期峰值变化, 还有 5 个不明显的周期峰变化 (其中插入部分有 3 个波峰). 显然, 放大控制系数能够明显影

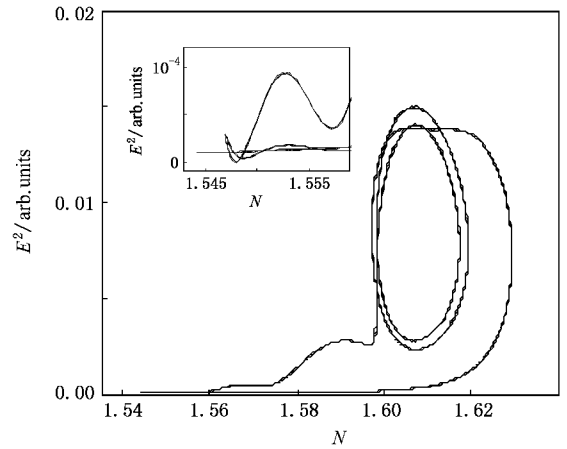


图 4 10 周期态. 内插图为局部放大

响激光动力学状态.

表 1 激光器参量取值

参 量	取 值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15
压缩和限制因子 $\Gamma$	0.29
群速折射率 $n_g$	3.8
腔内光子损耗 $\alpha_m/\text{cm}^{-1}$	29
腔外光子损耗 $\alpha_{\text{int}}/\text{cm}^{-1}$	20
载流子密度 $n_0/\text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
非辐射复合速率 $A_{nr}/\text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$
辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-10}$
俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	$3.5 \times 10^{-29}$
饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	$1.6619 \times 10^{11}$
增益常数 $\alpha/\text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{-16}$
光线宽增强因子 $\beta_e$	6
频差 $\Delta\omega_m/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$2\pi \times 10^9$
驱动电流 $I/\text{mA}$	25
注入光场幅值 $E_m/\text{m}^{-3/2}$	0.126 $E_s$
注入系数 $k$	0.03

当  $\rho = 0.22$  和  $\tau = 0.8 \text{ ns}$  时, 则有  $L_{\max} \approx 0$ , 激光混沌可以被控制到另一个 3 周期态, 结果如图 5 所示. 当  $\tau = 1.2 \text{ ns}$  时, 激光可被控制到一个 5 周期态, 如图 6 所示. 这都说明控制延时时间能够控制激光的动力学行为.

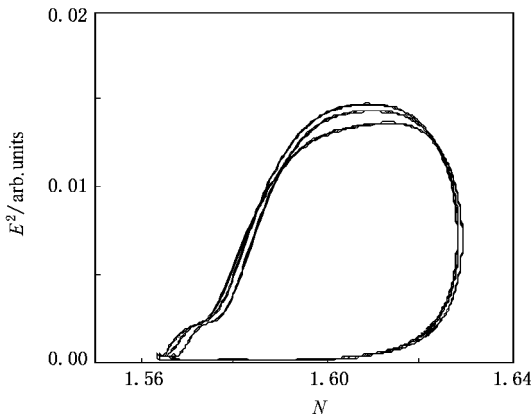


图 5 当  $\rho=0.22$  和  $\tau=0.8$  ns 时,混沌被控制到另一个 3 周期态

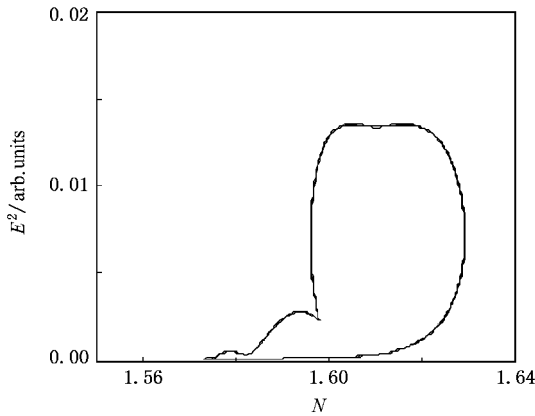


图 6 5 周期态

图 7 和图 8 是激光被分别控制到 8 周期态和 9 周期态的波形变化,其中控制参数取值为  $\rho=0.8$  以及延时时间分别为  $\tau=0.5$  ns 和  $\tau=1.1$  ns 时,它们的  $L_{max} \approx 0$ .图 7 显示出激光有 2 个明显的主周期峰值变化,还有约 6 个不明显的小周期峰变化.而图 8 则显示出 3 个明显的主峰,外加一个明显的边峰,同

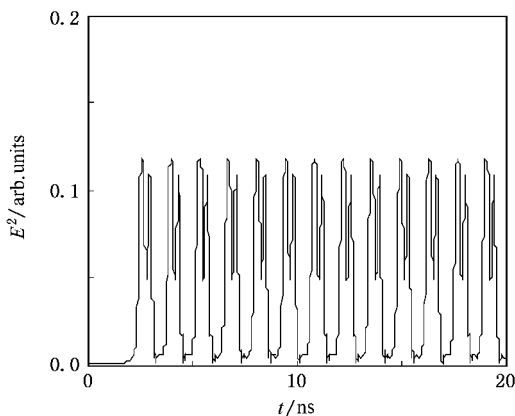


图 7 8 周期态波形

时还有 5 个非常微小的小周期峰.

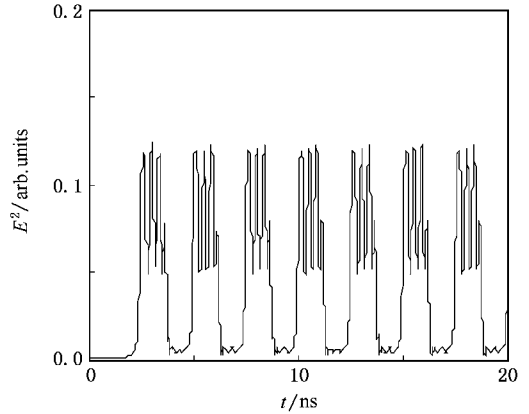


图 8 9 周期态波形

### 3.2. 光电延时电流周期键控及数值结果

在光电延时控制方法的基础上,这里进一步提出光电延时电流周期键控控制激光混沌方法.具体控制方法是用一个电流强度调制器键控放大器输送给激光器的电流.由此建立了新的控制方程

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I\{1 - \rho[1 + A \times S(2\pi Mt)]\}E^2(t - \tau)E_u^2}{q} - \gamma_e N - GV_p E^2, \quad (4)$$

式中  $S$  是电流调制函数(取周期方波函数), $M$  是调制频率, $A$  是调制深度.这样由(1a)(1b)和(4)式共同组成了一个新的混沌控制系统.取

$$\begin{aligned} M_m &= (I/q) [1 - \rho A E^2(t - \tau) E_u^2] S, \\ \delta \alpha(t - \tau) &= (I/q) [1 - 2\rho(1 + A \times S) \\ &\quad \times E(t - \tau) \delta E(t - \tau) E_u^2] \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

图 9 给出了这个数值过程,其中控制参数取值分别为  $\tau=1$  ns, $\rho=0.2$ , $A=0.5$  以及  $M=2$  GHz,而  $L_{max} \approx 0$ .控制的结果是激光输出呈现出一个 6 周期波动.

### 3.3. 光电延时与电流周期调制组合控制及数值结果

下面提出另一个光电延时与电流周期调制组合控制激光混沌的方法.具体控制方法是在光电延时控制条件下,再用一个电流强度调制器调制激光器驱动电流.由此又建立了一个新的组合控制方程

$$\frac{dN}{dt} = \frac{[1 + \zeta \times S(2\pi f_m t) - \rho E^2(t - \tau) E_u^2]}{q} - \gamma_e N - GV_p E^2, \quad (5)$$

式中  $S$  是附加的驱动电流调制函数且具有周期方

波变化形式,  $f_m$  是调制频率,  $\zeta$  是附加电流调制深度. 这样, 由 (1a) (1b) 和 (5) 式又共同组成了一个组合控制激光混沌系统. 取

$$M_m = (I/q)\zeta\delta S,$$

$$\delta C(t - \tau) = (I/q) \begin{bmatrix} -2\rho E(t - \tau) \\ \times \delta E(t - \tau) E_u^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

当控制参数取值分别为  $\tau = 0.75 \text{ ns}$ ,  $\rho = 0.25$ ,  $\zeta = 0.5$  及  $f_m = 2 \text{ GHz}$  时, 有  $L_{\max} \approx 0$ . 图 10 显示出激光被控制到有 2 个明显双周期波峰及 3 个微小周期波峰的 5 周期态. 当控制参数取值分别为  $\tau = 1.2 \text{ ns}$ ,  $\rho = 0.2$ ,  $\zeta = 0.2$  及  $f_m = 1 \text{ GHz}$  时, 则有  $L_{\max} = 0$ . 图 11 显示出 10 ns 后激光被有效地控制到单周期态上, 即激光器输出了具有频率为 1 GHz 的周期振荡光脉冲.

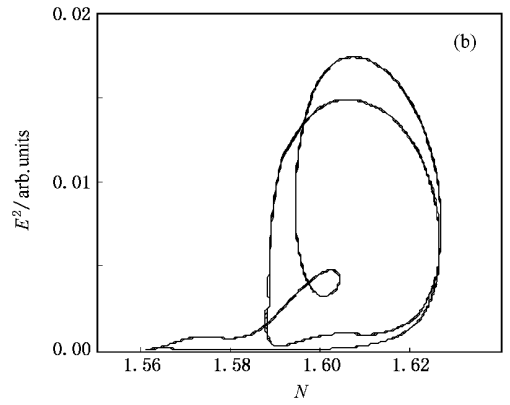
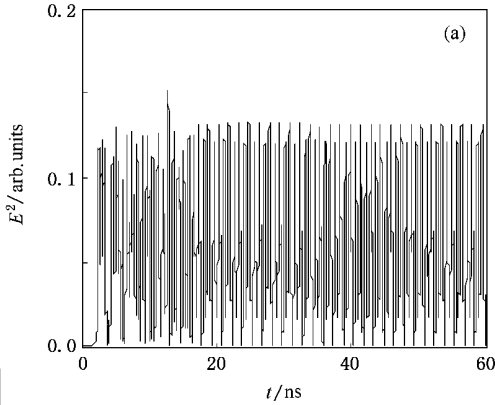


图 9 控制到 6 周期态的波形变化和相轨迹 (a) 波形 (b) 相图

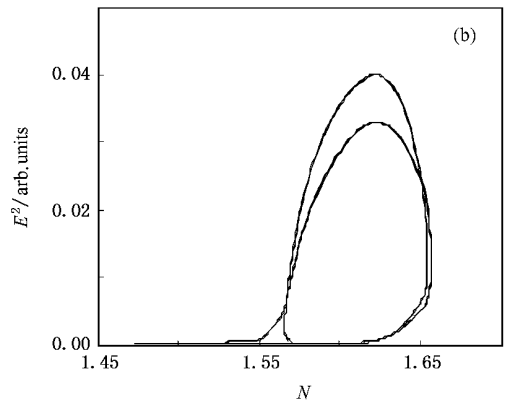
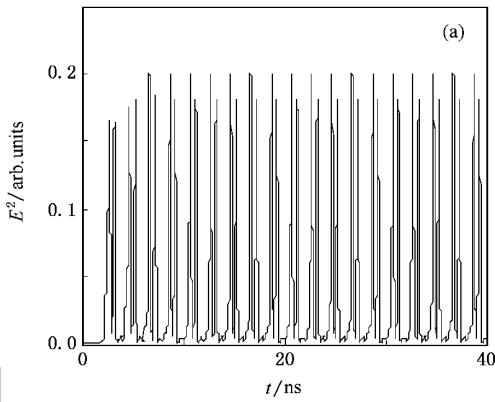


图 10 控制到 5 周期态的波形变化和相轨迹 (a) 波形 (b) 相图

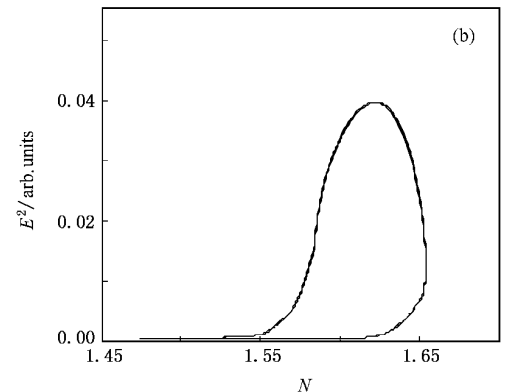
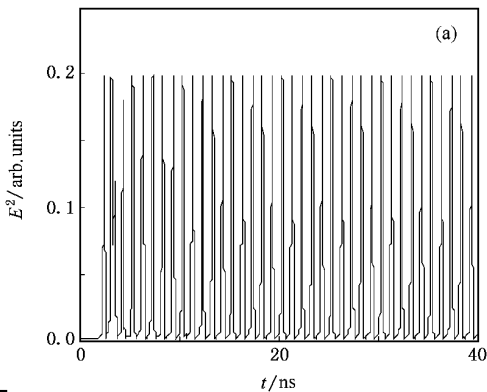


图 11 控制到单周期态的波形变化和相轨迹 (a) 波形 (b) 相图

## 4. 结 论

本文针对半导体激光器的特点, 分别用三种光

电控制混沌方法, 实现了将混沌激光控制到单周期态以及多周期态上. 这些控制方法对稳定激光工作状态和激光混沌控制研究及应用是非常有益的.

- 
- [ 1 ] Ott E ,Grebogi ,York J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [ 2 ] Pecora L M ,Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [ 3 ] Zhu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6248 ( in Chinese )[ 朱志宇 2006 物理学报 **55** 6248 ]
- [ 4 ] Li S H ,Cai H X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1687 ( in Chinese )[ 李世华、蔡海兴 2004 物理学报 **53** 1687 ]
- [ 5 ] Li J F ,Li N ,Lin H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1694 ( in Chinese ) [ 李建芬、李 农、林 辉 2004 物理学报 **53** 1694 ]
- [ 6 ] Colet P ,Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [ 7 ] Gu C M , Shen K 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 732 ( in Chinese )[ 顾春明、沈 柯 1998 物理学报 **47** 732 ]
- [ 8 ] Yun L ,Perter D ,Yoshiro T ,Arda T ,Sarto F ,Liu J N 2003 *IEEE Quantum Electron.* **39** 269
- [ 9 ] Tang S ,Liu J M 2003 *IEEE Quantum Electron.* **39** 1468
- [ 10 ] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5109 ( in Chinese )[ 颜森林 2006 物理学报 **55** 5109 ]
- [ 11 ] Wu L ,Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [ 12 ] Fan W H ,Tian X J ,Yu Y L ,Chen J F ,Luo H E 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5104 ( in Chinese )[ 范文华、田小建、于永力、陈菊芳、罗红娥 2006 物理学报 **55** 5104 ]
- [ 13 ] Li X F ,Pan W ,Ma D ,Luo B ,Zhang W L ,Xiong Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5094 ( in Chinese )[ 李孝峰、潘 炜、马 冬、罗 斌、张伟利、熊 悦 2006 物理学报 **55** 5094 ]
- [ 14 ] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6267 ( in Chinese )[ 颜森林 2006 物理学报 **55** 6267 ]
- [ 15 ] Lu K ,Sun J H ,Ouyang R B ,Huang L Y 1990 *Chaotic Dynamical Systems* ( Shanghai :Shanghai Translation Publishing House ) ( in Chinese )[ 卢 侃、孙建化、欧阳容百、黄来友 1990 混沌动力学( 上海 :上海翻译出版公司) ]

# Controlling chaos in a semiconductor laser via photoelectric delayed negative-feedback<sup>\*</sup>

Yan Sen-Lin

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

( Received 5 March 2007 ; revised manuscript received 3 September 2007 )

## Abstract

In this paper methods of chaos-control of a semiconductor laser are studied using a photoelectric delayed negative-feedback scheme with additive photoelectric delayed control , and the maximum Lyapunov exponent of the controlled system is analyzed. Three physical models of photoelectric delayed chaos-control of an injected semiconductor laser are presented. Firstly ,by adjusting the delay time or the feedback photocurrent , the chaotic laser can be conducted into period-3 state , period-5 or other multi-periodic states. Secondly , by periodic modulation of the photocurrent into the laser , the chaotic laser can be brought into a period-8 states or a period-9 state. Lastly , we make use of the photoelectric delayed negative-feedback and an additive current modulation to perform chaos-control , the chaotic laser can be stabilized into a single-periodic state or multi-periodic state.

**Keywords** : chaos , control , laser , photoelectric conversion

**PACC** : 0545 , 4255P , 4260

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Scientific Research Program of the Education Bureau of Jiangsu Province , China ( Grant No. 06KJ140111 ).