

# 外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振 可调制控制方法研究<sup>\*</sup>

颜森林<sup>†</sup>

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2008 年 2 月 5 日收到, 2008 年 3 月 25 日收到修改稿)

提出外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振可调制控制方法, 分别建立了垂直正交偏振延时双反馈、同偏振面方向延时双反馈以及任意可调偏振延时双反馈激光动力学物理模型. 通过调节激光器外腔光路中的平面镜和光衰减器可控制一平面偏振反馈光的延时时间及光反馈量, 或调节一偏振反馈光的偏振面到另一个偏振反馈光的偏振面方向上或者到任意偏振方向都可进行激光混沌控制. 数值结果证明该方法可以控制激光混沌到单周期态、多周期态等, 还发现该控制可使激光器同时呈现偏振周期振荡、偏振反周期振荡、稳定三种动力学行为等.

关键词: 混沌, 控制, 激光器, 偏振

PACC: 0545, 4260, 4265S

## 1. 引言

混沌是自然界普遍存在的一种非线性变化现象, 具有对初值条件极为敏感以及具有随机变化特点, 其长期行为是难以预测的. 然而, 其背后隐藏着有序的本质特性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<sup>[3-5]</sup>. 上世纪 90 年代, OGY 混沌控制方法提出后<sup>[1]</sup>, 混沌控制研究迅速发展<sup>[2-4]</sup>, 其中激光混沌控制研究也受到人们特别关注, 主要有光反馈方法、光相位调制方法、注入周期信号方法以及电流周期扰动方法等<sup>[5-7]</sup>.

在光通信及光器件应用中, 光反馈一直受到人们的重视. 例如, 在全光通信中, 由于很难完全隔离外部光进入激光器, 很小量的光反馈都能引起激光器工作不稳定<sup>[8,9]</sup>, 随着反馈光强度增加, 激光的动力学行为会变得非常复杂, 会出现相干光塌陷、频谱展宽、分岔和混沌等现象<sup>[10-13]</sup>. 本文着重研究外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振可调制控制方法, 通过调节控制偏振光, 可实现对激光混沌的周期控

制等.

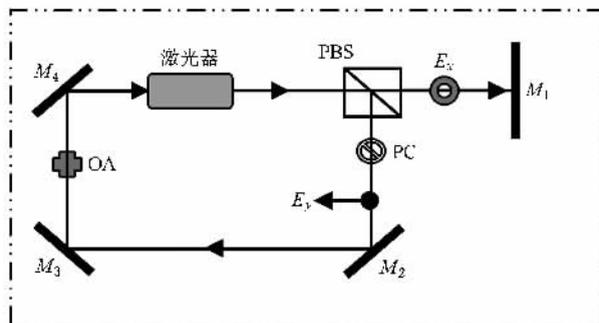


图 1 外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振控制模块 ( $E_x, E_y$  分别是  $x$  平面偏振光和  $y$  平面偏振光,  $M_{1,2,3,4}$  是平面镜, PBS 是偏振分光镜, PC 是偏振控制器, OA 是光衰减器)

## 2. 物理模型

### 2.1. 垂直正交偏振控制方法

外腔延时反馈半导体激光器, 在实验和理论上被广泛研究过<sup>[6-10]</sup>, 由于激光器外腔延时反馈作用, 激光会呈现出许多复杂不稳定动力学现象, 如在很大反馈参数范围内, 激光都会呈现出混沌状态<sup>[6-8]</sup>.

<sup>\*</sup> 江苏省教育厅高校自然科学研究指导性计划项目(批准号 D6KJ140111)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yansenlinbsh@sina.com

为了控制激光混沌,先设计出外腔垂直正交偏振光延时双反馈半导体激光器混沌控制系统,如图 1 所示.偏振分光镜 PBS 把激光器输出光分为  $x$  平面偏振光  $E_x$  和  $y$  平面偏振光  $E_y$ ,且两偏振光平面垂直正交.然后,两偏振光  $E_x$  和  $E_y$  再分别被平面镜  $M_1$  及  $M_{2,3,4}$  反馈回到激光器中.与此同时,偏振控制器 PC 可控制  $E_y$  偏振面方向,光衰减器 OA 可控制反馈光  $E_y$  反馈量.如这里没有偏振分光镜 PBS、偏振控制器 PC、光衰减器 OA 以及平面镜  $M_{2,3,4}$  等光器件的存在,该系统就是人们所熟知的外腔延时反馈激光器<sup>[12,13]</sup>.下面给出控制系统的动力学方程组<sup>[9,11]</sup>:

$$\frac{dE_x}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\beta_c)(G_x - \gamma_{px})E_x(t) + \frac{k_x}{\tau_{Lx}}E_x(t - \tau_x)\exp(-i\omega_x\tau_x), \quad (1a)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\beta_c)(G_y - \gamma_{py})E_y(t) + \frac{k_y}{\tau_{Ly}}E_y(t - \tau_y)\exp(-i\omega_y\tau_y), \quad (1b)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - G_x V_p |E_x(t)|^2 - G_y V_p |E_y(t)|^2, \quad (1c)$$

其中,角标  $x, y$  分别表示  $x$  偏振面与  $y$  偏振面.  $E$  是激光场慢变部分,  $N$  是激光器载流子数.  $\beta_c$  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,  $A_{nr}$  是非辐射复合速率,  $B$  是辐射复合因子,  $C$  是俄歇复合因子.  $k$  是光反馈系数.  $\tau_{Lx, y} = 2n_{gx, y}L/c$  是光在激光器腔长  $L$  内来回一周的时间,  $c$  是真空中光速,  $n_{gx, y} = c/v_{gx, y}$  是激光器群速折射率,  $v_g$  是光子群速率.  $\tau$  是激光在外腔中传输延时时间,  $\omega$  是激光频率.  $\gamma_p = v_g\alpha$  是光子

损耗速率,  $\alpha$  是光子损耗系数.  $I$  是驱动电流,  $q$  是单位电荷. 激光模式增益为  $G_{x, y} = (\Gamma_{x, y}v_{gx, y}a_{x, y}/V)(N - N_{th})\sqrt{1 + |E_{x, y}|^2/|E_s|^2}$ <sup>[10,11]</sup>, 其中,  $a$  是增益常数,  $\Gamma = V/V_p$  是压缩和限制因子,  $V$  是腔体积,  $V_p$

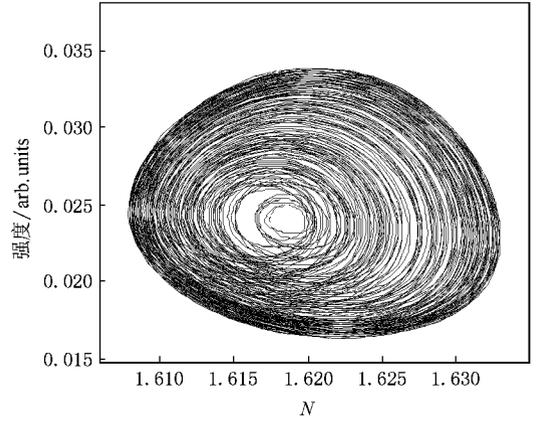


图 2 典型的激光混沌吸引子

是激光模式体积,  $N_{th} = n_{th}V$  是激光透明时的载流子数,  $n_{th}$  是它的密度值,  $|E_s|$  是饱和光子场振幅. 为了简便, 本文设定<sup>[10,11]</sup>:  $\gamma_{px} = \gamma_{py} = \gamma_p$ ,  $\Gamma_x = \Gamma_y = \Gamma$ ,  $\omega_x = \omega_y = \omega$ ,  $n_{gx} \approx n_{gy} = n_g$ ,  $a_x = a_y = a$ . 混沌具体控制过程是, 平面镜  $M_{2,3,4}$  控制  $E_y$  光的延时时间, 光衰减器 OA 控制其反馈量, 这样  $\tau_y$  和  $k_y$  可作为控制参数. 数值结果显示(数值模拟中用表 1 参量), 当没有控制时, 图 2 显示该激光器已处于混沌状态. 当控制实施后, 当  $\tau_y = 2.1$  ns,  $k_y = 0.003$  时, 激光混沌可控制到周期态, 如图 3 所示, 其中 (a) 是激光器在控制 40 ns 后的二偏振光和载流子数变化在相空间所形成的周期吸引子, (b) 是激光器在控制过程中输出的波形变化, 可以看到 30 ns 以后, 激光输出强

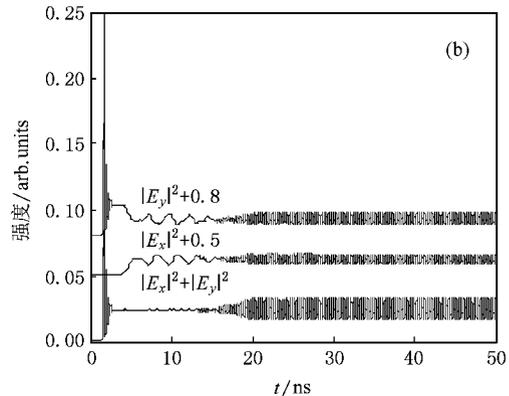
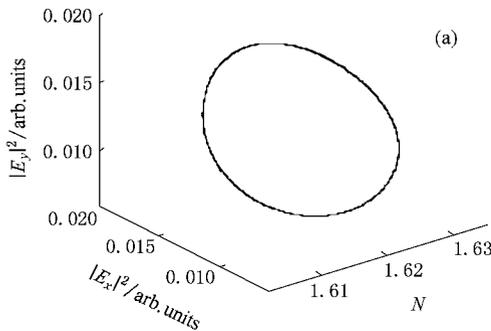


图 3 激光被控制到周期态

度已呈现出周期变化,并和  $|E_x|^2$  及  $|E_y|^2$  呈现同步同周期变化,且变化频率都是 3.35 GHz. 进一步发现,当  $\tau_y$  分别取 1.6 ns, 1.8 ns, 2.05 ns, 2.2 ns, 2.26 ns, 2.31 ns, 2.34 ns, 2.35 ns, 2.46 ns, 2.5 ns 时,激光都可控制到周期态,其变化频率大约都是 3.35 GHz. 而当  $\tau_y = 2.3$  ns,  $k_y = 0.0012$  时,图 4 显示输出激光强度被稳定控制的情况,虽然图 4(a)呈现出二偏振

光是周期变化的(图中周期吸引子是 40 ns 后形成的),但在图 4(b)中发现,在 4 ns 后,激光强度已趋于稳定,主要原因是二偏振光具有反相位周期变化,通常情况下这是非常罕见的<sup>[9-13]</sup>,即在有效控制后,偏振光  $|E_x|^2$  是周期变化的,偏振光  $|E_y|^2$  是反周期变化的,激光强度则是稳定的,实现了一个激光器可有三种行为激光控制输出.

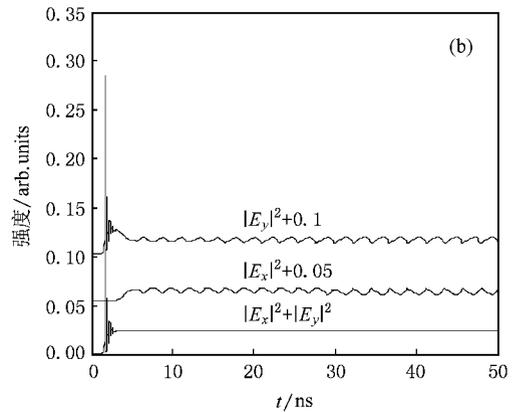
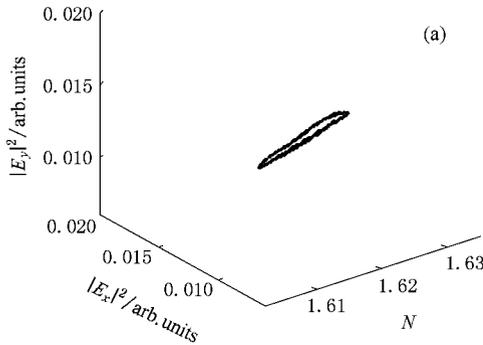


图 4 激光强度被稳定控制

表 1 激光器参量

参量	值	参量	值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350	辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-10}$
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2	俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$	$3.5 \times 10^{-29}$
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15	饱和光子场振幅 $ E_s /\text{m}^{-3/2}$	$1.6619 \times 10^{11}$
压缩和限制因子 $\Gamma$	0.29	增益常数 $\alpha/\text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{-16}$
群速折射率 $n_g$	3.8	光线宽增强因子 $\beta_c$	6
光子损耗系数 $\alpha/\text{cm}^{-1}$	49	驱动电流 $I/\text{mA}$	30
延时时间 $\tau_x/\text{ns}$	1.6	频率 $\omega/\text{Rad s}^{-1}$	$1438 \times 10^{12}$
反馈系数 $k_x$	0.01	激光透明时载流子密度 $n_{\text{th}}/\text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
非辐射复合速率 $A_{\text{nr}}/\text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$		

### 2.2. 同偏振面方向控制

在图 1 基础上,在  $E_y$  反馈光路中,操作偏振控制器 PC 使  $E_y$  偏振光振动面旋转到  $E_x$  偏振光振动面方向上,即可实现同偏振面方向控制混沌. 这里需要重新建立控制方程组,其中在(1a)式右边增加  $E_y$  偏振光反馈一项

$$+ \frac{k_y}{\tau_{Lx}} E_y(t - \tau_y) \exp(-i\omega_y \tau_y),$$

而原来的(1b)式右边的第二项  $E_y$  偏振反馈光一项

舍去. 这样也可控制激光混沌到周期态,控制结果如图 5 所示,其中控制参数  $\tau_y = 1.6$  ns,  $k_y = 0.019$ .

### 2.3. 任意偏振面方向控制

进一步利用偏振控制器 PC,控制 PC 使  $E_y$  偏振光振动面旋转到和  $E_x$  偏振光振动面成  $\theta$  角度方向上,即可实现任意偏振面方向控制混沌. 重新建立的控制方程组是在原来的(1a)式右边增加  $E_y$  偏振反馈光在  $E_x$  偏振面方向上投影一项

$$+ \frac{k_y}{\tau_{Lx}} \cos(\theta) E_y(t - \tau_y) \exp(-i\omega_y \tau_y),$$

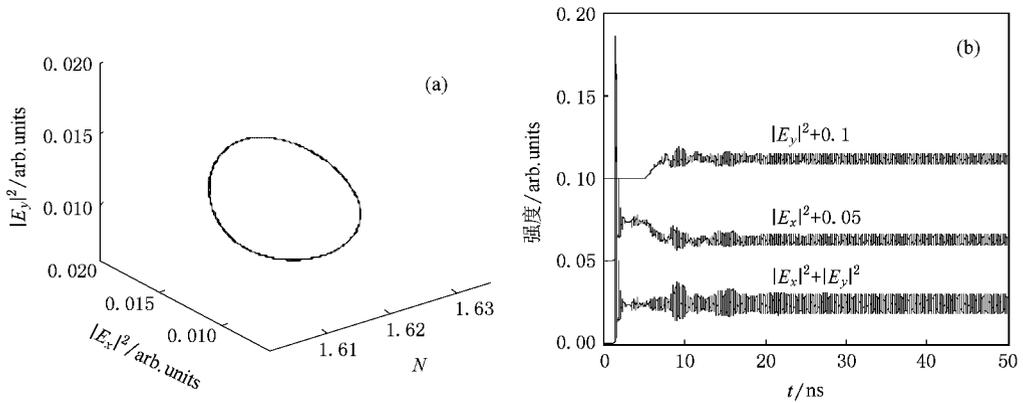


图 5 激光混沌被控制到周期态

而原来的 (1b) 式右边的第二项  $E_y$  偏振反馈光一项则改写为

$$+ \frac{k_y}{\tau_{1y}} \sin(\theta) E_y(t - \tau_y) \exp(-i\omega_y \tau_y),$$

控制结果如图 6 和图 7 所示,其中图 6 控制参数是

$\tau_y = 2.2 \text{ ns}, k_y = 0.018, \theta = \pi/10$ , 激光可被控制到七周期态. 图 7 取  $\tau_y = 2.1 \text{ ns}, k_y = 0.01, \theta = \pi/12$  时, 激光则可被控制到拍输出态, 其中图 (a) 是类多周期吸引子 (b) 是准周期拍变化, 拍频约 0.24 GHz.

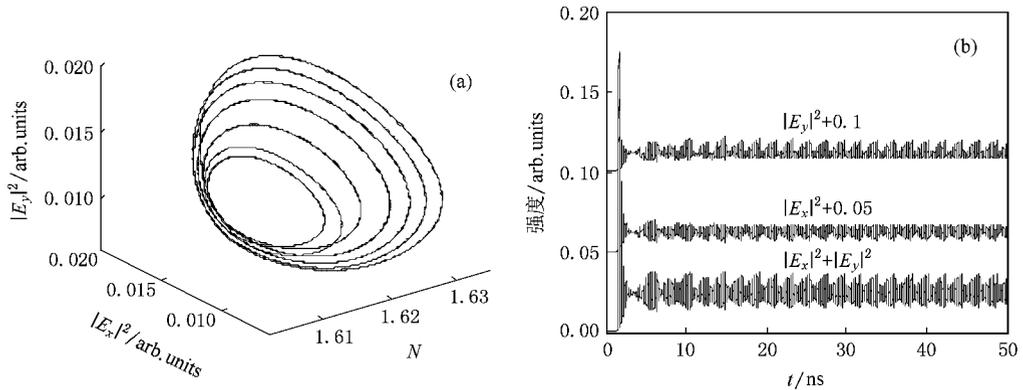


图 6 激光被控制到七周期态

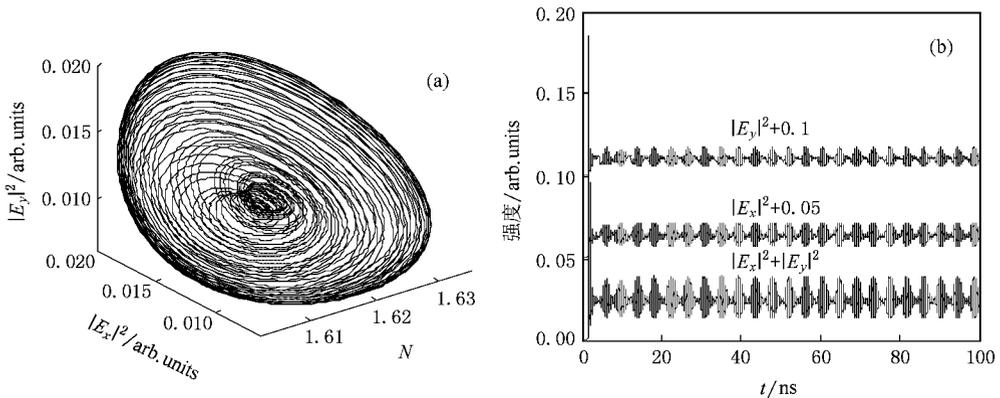


图 7 激光呈现出拍输出

### 3. 结 论

本文提出外腔延时反馈激光器混沌偏振可调控

制方法,实现了激光混沌周期控制、多周期控制、激光偏振周期控制、反周期控制及激光稳定控制等,该控制方法对激光混沌控制及其应用研究是非常有益的.

- [ 1 ] Ott E , Grebogi , York J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [ 2 ] Tong P Q , He J Y 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 1551 ( in Chinese )  
[ 童培庆、何金勇 1995 物理学报 **44** 1551 ]
- [ 3 ] 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 ]
- [ 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 ] 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 ]
- [ 6 ] Liu X M , Tang X , Lu F , Ng J , Zhou X , Lu C 2005 *Opt. Express* **13** 142
- [ 7 ] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5109 ( in Chinese ) [ 颜森林 2006 物理学报 **55** 5109 ]
- [ 8 ] Wu L , Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [ 9 ] Yanhua H , Rui J , Paul S , Shore K A 2005 *IEEE Quantum Electron.* **41** 619
- [ 10 ] Julien J , Josep M , Salvador B 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 163902
- [ 11 ] 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** 5105 ]
- [ 12 ] 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 ]
- [ 13 ] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6267 ( in Chinese ) [ 颜森林 2006 物理学报 **55** 6267 ]

## Control of chaos in an external cavity delay feedback semiconductor laser via modulating the polarizing light \*

Yan Sen-Lin

( Department of Physics , Nanjing Xiaozhuang University , Nanjing 210017 , China )

( Received 5 February 2008 ; revised manuscript received 25 March 2008 )

### Abstract

Control of chaos in an external cavity delay feedback semiconductor laser via modulating the feedback polarizing light is studied. The laser dynamic physical models of the delayed feedback of dual beams with orthogonal polarizing , with parallel polarizations , or with synchronous or arbitrary polarizing directions are presented , respectively. The delay time and feedback quantity of the feedback light can be adjusted by adjusting the mirror and the optical attenuator in the external optical path , or by adjusting the polarization plane of one beam of polarized light with respect to the polarization direction of the other beam , or at an arbitrary polarization direction to the other beam of polarizing light. In all these cases , the chaotic laser can be controlled. Numerical results show that the laser can be conducted to the single cycle or the multi-cycle , and at the same time be in the polarizing oscillation , polarizing anti-oscillation or stable states .

**Keywords** : chaos , control , laser , polarization

**PACC** : 0545 , 4260 , 4265S

\* Project supported by the Academic Natural Science Directory Program of The Education Department of Jiangsu Province of China ( Grant No. 06KJD140111 ).