

文章编号: 0258-7025(2009)02-0297-05

# 增益可调半导体激光器混沌偏振延时 双反馈周期的控制方法

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 江苏 南京 210017)

**摘要** 提出增益可调半导体激光器混沌偏振延时双反馈控制方法, 分别建立了垂直正交偏振延时双反馈、偏振  $\pi/2$  转动延时反馈控制以及同偏振面方向延时正负反馈激光动力学物理模型等。通过调节激光器外腔光路中的平面镜可控制一平面偏振反馈光的延时时间, 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, 或者通过偏振器对偏振光进行相位补偿都可以进行激光混沌控制。数值结果证明该方法可以有效控制激光混沌到周期态等。

**关键词** 物理光学; 激光混沌; 控制; 偏振

中图分类号 O415.5; O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093602.0297

## Period Chaos Controlling in a Gain-Modulated Semiconductor Laser by Delay Polarization Feedback

Yan Senlin

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

**Abstract** Control of chaos in a gain-modulated feedback semiconductor laser is studied via performing the dual-polarizing light. The laser dynamic physical models of the delay feedback orthogonal polarizing light, the  $\pi/2$ -rotated polarization, the synchronous polarizing directional light are presented, respectively. The chaotic laser can be controlled by adjusting the mirror in external optical path to control the delay time of the polarizing light, or conversing one polarizing light at another polarizing direction, or compensating phase of polarizing light via the polarimeter. Numerical results illustrate that the chaotic laser can be controlled to periodic states.

**Key words** physical optics; chaotic laser; control; polarization

## 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随机变化的特点, 其长期行为是难以预测的。但其背后隐藏着有序的本质特性现已逐渐被人们所发现。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。20 世纪 90 年代, OGY 方法提出后<sup>[1]</sup>, 混沌控制方法迅速发展<sup>[2~4]</sup>。其中激光混沌控制及应用研究受到人们广泛重视,

提出了多种激光混沌控制方法, 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>[2~6]</sup>。本文着重研究增益可调半导体激光器混沌偏振双反馈控制方法, 通过调节偏振器控制偏振光, 可实现对激光混沌的周期控制等。

## 2 物理模型

### 2.1 正交偏振双反馈控制以及偏振单反馈控制

增益可调半导体激光器在实验和理论上被广泛

收稿日期: 2008-04-14; 收到修改稿日期: 2008-06-10

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(08KJD510019)资助课题。

作者简介: 颜森林(1962—), 男, 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: yansenlinbsh@sina.com

研究过<sup>[7]</sup>,由于调制激励作用,激光会呈现出许多复杂不稳定动力学现象,如激光常常会呈现出混沌等状态<sup>[7]</sup>。为了控制混沌,先设计出垂直正交偏振光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  $x$  平面偏振光和  $y$  平面偏振光,且  $x$  偏振面和  $y$  偏振面垂直正交,两偏振光  $E_x$  和  $E_y$  分别被平面镜  $M_1$  以及  $M_2$  再反馈回到激光器中,这样可给出控制系统的动力学方程组<sup>[8~14]</sup>

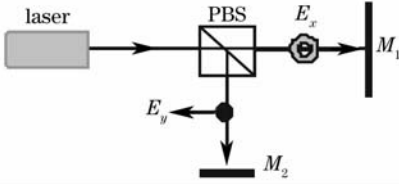


图 1 激光器混沌正交偏振双反馈控制模块

Fig. 1 Control of chaotic laser with orthogonal polarizing dual-optical-feedbacks

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

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

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

其中角标  $x, y$  分别表示垂直正交的  $x$  偏振面与  $y$  偏振面。 $E$  为激光场慢变部分,  $N$  为激光器载流子数。 $\beta_c$  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。 $k$  为光反馈比例系数。 $\tau_{Lx, y} = 2n_{gx, y}L/c$  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,  $n_{gx, y} = c/v_{gx, y}$  为激光器群速折射率。 $\tau$  为激光在外腔中传输延时时间,  $\omega$  为激光频率。 $\gamma_p = v_g\alpha$  为光子损耗速率,  $\alpha$  为光子损耗系数。 $I$  为驱动电流,  $q$  为单位电荷。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>[14]</sup>, 其中  $a$  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;  $N_{th} = n_{th}V$  为激光透明时的载流子数,  $n_{th}$  为它的密度值,  $|E_s|$  为饱和光子场强。 $m$  为调制深度,  $f$  为调制频率。为了简便,可取<sup>[10, 11]</sup>:

$\gamma_{px} = \gamma_{py} = \gamma_p$ ,  $\Gamma_x = \Gamma_y = \Gamma$ ,  $\omega_x = \omega_y = \omega$ ,  $n_{gx} \approx n_{gy} = n_g$ ,  $a_x = a_y = a$ 。混沌偏振双反馈控制过程是,平面镜  $M_{1,2}$  分别控制  $E_x$  和  $E_y$  偏振光的延时时间,这样  $\tau_x$  和  $\tau_y$  可作为双控制参数。

偏振单反馈控制方法是,仅反馈部分偏振光  $E_x$  或者部分偏振光  $E_y$  到激光器中。其控制方程则是,如是偏振光  $E_x$  单反馈,则(1b)式右边仅保留  $[(1 + i\beta_c)/2](G_y - \gamma_{py})E_y(t)$  一项;如是偏振光  $E_y$  单反馈,则(1a)式右边仅保留  $[(1 + i\beta_c)/2](G_x - \gamma_{px})E_x(t)$  一项。

表 1 激光器参量

Table 1 Parameters of laser

Parameter	Value	Parameter	Value
Length / $\mu\text{m}$	350	$B / \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-10}$
Width / $\mu\text{m}$	2	$C / \text{cm}^5 \cdot \text{s}^{-1}$	$3.5 \times 10^{-29}$
Depth / $\mu\text{m}$	0.15	$ E_s  / \text{m}^{-3/2}$	$1.6619 \times 10^{11}$
$\Gamma$	0.29	$\alpha / \text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{-16}$
$n_g$	3.8	$\beta_c$	6
$\alpha / \text{cm}^{-1}$	49	$I / \text{mA}$	30
$m$	0.08	$\omega / \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$1438 \times 10^{12}$
$f / \text{GHz}$	1.5	$n_{th} / \text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
$A_{nr} / \text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$		

数值模拟中用表 1 参量,其结果是,当没有偏振控制时,图 2 显示出该激光器动力学行为处于混沌态。在进行偏振双反馈控制后,控制结果如图 3 所示,其控制参数取  $\tau_x = 1.8 \text{ ns}$ ,  $\tau_y = 1.8 \text{ ns}$ ,  $k_x = 0.008$ ,  $k_y = 0.005$ 。图 3(a)显示出激光约在 30 ns 后已被控制到具有 1.5 GHz 的周期态,同时  $E_x$  偏振光约在 10~30 ns 也被逐步控制趋于 1.5 GHz 的周期态,但  $E_y$  偏振光却受到抑制并趋于零稳定态。三维相图 3(b)显示在 40~50 ns  $E_x$  偏振光趋于周期而  $E_y$  偏振光趋于零稳定的过程,图 3(c)则是激光被有效控制到周期态的二维相图。图 4 是另一次控制到周期态的数值过程,控制参数取  $\tau_x = 1.8 \text{ ns}$ ,  $\tau_y = 2.2 \text{ ns}$ ,  $k_x = 0.008$ ,  $k_y = 0.01$ 。其中,图 4(a)是激光以及  $E_x$  偏振光和  $E_y$  偏振光在控制过程中其强度变化,可见  $E_x$  偏振光已被完全抑制,激光强度主要由  $E_y$  偏振光决定,其周期变化频率为 1.5 GHz。图 4(b)则显示 40~50 ns 在相空间中  $E_y$  偏振光周期形成而  $E_x$  偏振光趋于零稳定的过程。

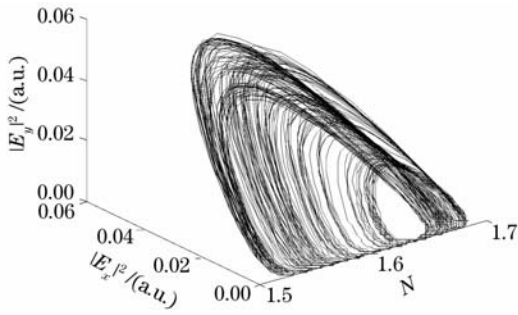


图 2 典型的激光混沌吸引子

Fig. 2 Typical chaotic laser attractor

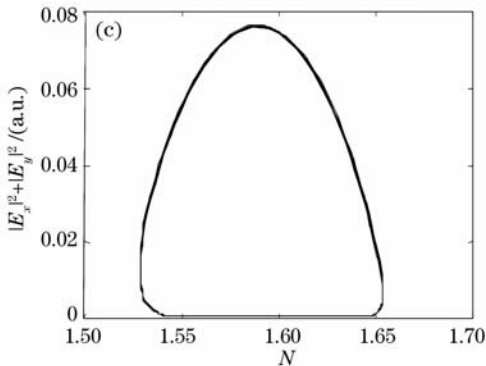
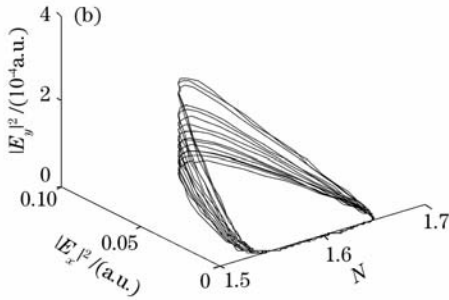
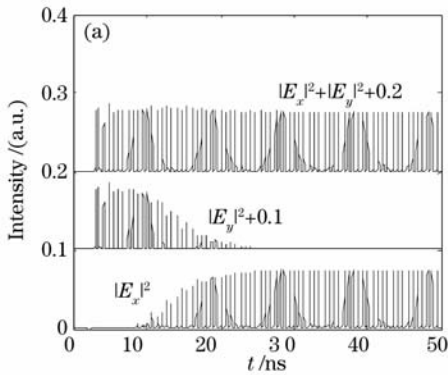


图 3 偏振双反馈控制结果。(a)激光强度变化；

(b) 三维空间周期吸引子；(c) 二维空间周期吸引子

Fig. 3 Dual-polarizing feedback control. (a) Intensity; (b) Periodic attractor in three-dimensional phase space; (c) Periodic attractor in two-dimensional phase space

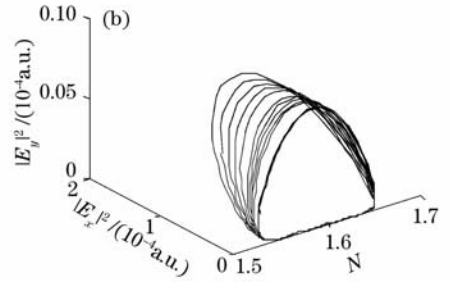
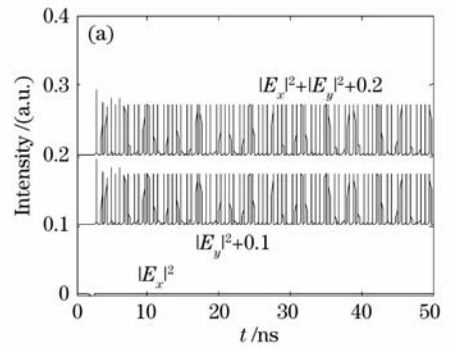


图 4 偏振双反馈另一回控制结果

(a)激光强度变化；(b)三维空间周期吸引子

Fig. 4 Another dual-polarizing feedback control. (a) Intensity;

(b) Periodic attractor in three-dimensional phase space

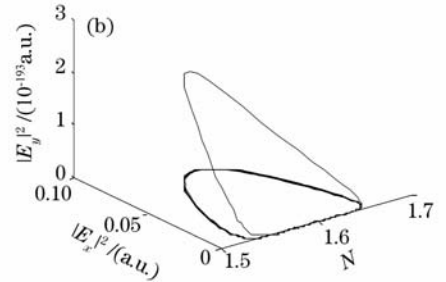
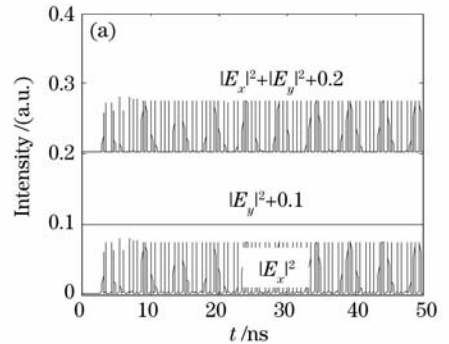


图 5 偏振单反馈控制结果

(a)激光强度变化；(b)三维空间周期吸引子

Fig. 5 Single-polarizing feedback control. (a) Intensity;

(b) Periodic attractor in three-dimensional phase space

偏振单反馈控制结果如图 5 所示,其中仅进行  $x$  偏振面方向控制,控制参数是  $\tau_x = 1.6 \text{ ns}$ ,  $k_x = 0.03$ 。由于是单反馈控制,所以其反馈系数取较双反馈控制时要大才能有效控制混沌。图 5(a)是激光强度变化以及  $E_x$  偏振光和  $E_y$  偏振光变化过程,可

见  $E_y$  偏振光已被完全抑制, 激光强度主要由  $E_x$  偏振光决定, 其周期变化频率是 1.5 GHz。图 5(b) 则是 40~50 ns 期间激光在相空间  $E_x$  偏振光周期形成而  $E_y$  偏振光趋于零稳定的过程。总的来看, 激光偏振双反馈控制以及单反馈控制都能有效控制激光混沌到周期。

### 2.2 偏振 $\pi/2$ 转动控制

如图 6 所示, 偏振分光镜 PBS 把输出激光分为正交  $x$  平面偏振光和  $y$  平面偏振光, BM 是半透反射镜, 既能反射部分  $E_x$  偏振光, 也能让部分  $E_x$  偏振光通过。  $M_{1,2,3}$  都是平面镜, PC 是偏振控制器, ISO 是光隔离器。其中, 光隔离器 ISO 隔离 PBS,  $M_2$  以及  $M_3$  反射出的偏振光  $E_y$ , 但能让  $E_x$  偏振光通过。在 PC 和  $M_{1,2,3}$  组成的反馈光路中, 操作偏振控制器 PC 使  $E_x$  偏振光振动面旋转  $\pi/2$  到  $y$  偏振面方向上, 即可实现偏振  $\pi/2$  转动控制混沌。重新建立的场控制方程组为

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

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

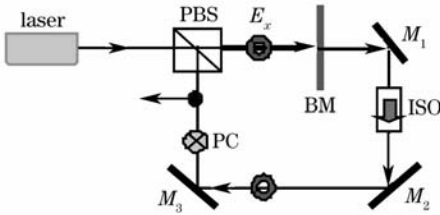


图 6 激光器混沌偏振  $\pi/2$  转动模块

Fig. 6 Control of chaotic laser with  $\pi/2$ -polarization

控制结果如图 7 所示, 控制参数取  $\tau_x = 1.8$  ns,  $\tau_y = 2.2$  ns,  $k_x = 0.015$ ,  $k_y = 0.015$ 。结果激光以及  $E_x$  偏振光和  $E_y$  偏振光都被控制到同周期变化状态且都具有 1.5 GHz。

### 2.3 同偏振面方向正负反馈控制

在图 6 基础上, 如偏振控制器 PC 让偏振光  $E_x$  部分通过  $M_{1,2,3}$  反馈到激光器中, 即可实现同偏振面方向双负反馈控制混沌。如去掉偏振控制器 PC, 这样部分偏振光  $E_x$  可通过  $M_{1,2,3}$  反馈到激光器中, 可实现同偏振面方向正负反馈控制混沌。其新建立的场控制方程组为

$$\frac{dE_x}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\beta_c)(G_x - \gamma_{px})E_x(t) +$$

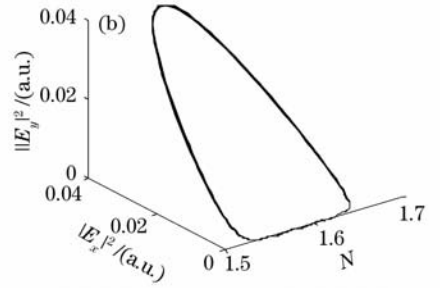
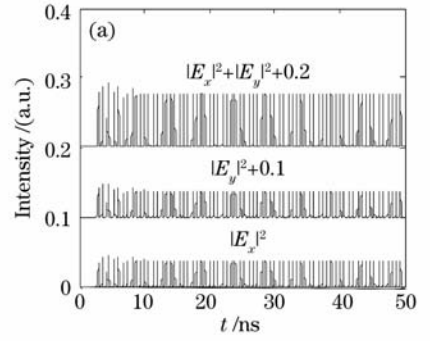


图 7 偏振  $\pi/2$  转动反馈控制结果

(a) 激光强度变化; (b) 三维空间周期吸引子

Fig. 7  $\pi/2$  rotated polarization feedback control. (a) Intensity; (b) Periodic attractor in three-dimensional phase space

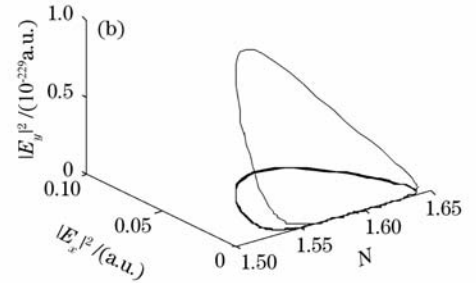
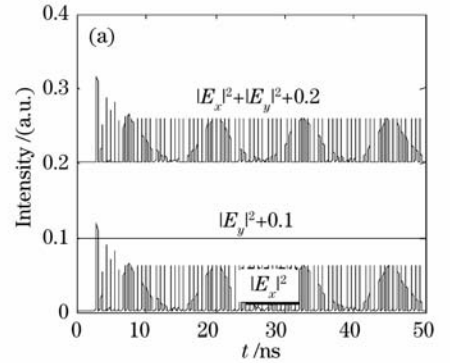


图 8 同偏振面方向正负反馈控制结果

(a) 激光强度变化; (b) 三维空间周期吸引子

Fig. 8 Synchronous polarizing directional control. (a) Intensity; (b) Periodic attractor in three-dimensional phase space

$$\frac{k_x}{\tau_{Lx}}E_x(t - \tau_x)\exp(-i\omega_x\tau_x) + \frac{k_y}{\tau_{Ly}}E_x(t - \tau_y)\exp(\pm i\omega_x\tau_y), \quad (3a)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\beta_c)(G_y - \gamma_{py})E_y(t), \quad (3b)$$

其中(3a)式右边的第三项“+”中表示偏振正反馈控制,“-”表示偏振负反馈控制。其中正负反馈控制结果如图 8 所示,控制参数取  $\tau_x = 1.8 \text{ ns}$ ,  $\tau_y = 3 \text{ ns}$ ,  $k_x = 0.03$ ,  $k_y = 0.03$ 。可见在图 8(a)中  $E_y$  偏振光已被完全抑制,激光强度主要由  $E_x$  偏振光决定,激光周期变化频率是 1.5 GHz。进一步数值研究发现,在进行正负反馈控制时,如控制参数取  $\tau_x = 1.6 \text{ ns}$ ,  $\tau_y = 2.8 \text{ ns}$ ,  $k_x = 0.008$ ,  $k_y = 0.004$  时,激光也能控制到类似图 8 的结果,即可控制到具有 1.5 GHz 的周期态。

### 3 结 论

提出激光混沌偏振双反馈控制方法,能有效进行激光混沌周期控制,该控制方法对激光混沌控制及其应用研究有较好的参考价值。

#### 参 考 文 献

- 1 E. Ott, C. Grebogi, J. A. York. Controlling chaos[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(11):1196~1199
- 2 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
- 3 K. Noriyuki, L. Yun, O. Junji. Chaos control and noise suppression in external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1): 56~65
- 4 R. Chacon, J. D. Bejarano. Routes to suppressing chaos by weak periodic perturbations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(19),3103~3106
- 5 A. Uchida, T. Sato, F. Kannari. Suppression of chaotic oscillations in a microchip laser by injection of a new orbit into the chaotic attractor [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(6),460~462
- 6 S. L. Yan. Study on the method of controlling chaos in an Er-doped fiber dual-ring laser via external optical injection and shifting optical feedback light[J]. *Chaos*, 2007, **17**(1): 013106
- 7 L. Wu, S. Q. Zhu. Communications using multi-mode laser system based chaotic synchronization [J]. *Chinese Physics*, 2003, **12**(3):300~304
- 8 Zhang Weili, Pan Wei, Luo Bin *et al.*. Theoretical analysis of odd and even phase conjugate cavity vertical-cavity surface emitting laser nonlinear system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 179~184  
张伟利,潘 炜,罗 斌等. 奇偶反馈相位共轭腔垂直腔面发射激光器非线性系统的理论研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 179~184
- 9 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
- 10 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
- 11 Luo Liguang, 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
- 12 Fang Nian, Wang Lutang, Guo Shuqin *et al.*. Security of polarization-shift keying chaos optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6):812~817  
方 捻,王陆唐,郭淑琴等. 偏振态移位键控光混沌通信系统的保密性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6):812~817
- 13 Yan Senlin. High rate chaos secure communications systems of multiple-quantum-well lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2):179~185  
颜森林. 高速多量子阱激光器混沌保密通信系统研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2):179~185
- 14 Yan Senlin, Chi Zeyang, Chen Wenjian. Synchronizations of chaotic lasers and its application to optical fiber secure communication[J]. *Science in China (Ser E)*, 2004, **34**(4):467~480  
颜森林,迟泽英,陈文建. 激光混沌同步及其在光纤保密通信中的应用[J]. *中国科学 (E 辑)*, 2004, **34**(4):467~480