

文章编号: 0258-7025(2009)08-1968-05

延时光电反馈法实现半导体激光器的混沌控制

王彦斌^{1,2} 张胜海² 米朝伟² 王 伟²

(¹国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
(²信息工程大学理学院数理系, 河南 郑州 450001)

摘要 采用延时光电反馈法实现了半导体激光器的混沌控制。首先通过数值计算激光器的动力学方程, 绘制了系统的最大李雅普诺夫(Lyapunov)指数随注入电流调制强度的变化曲线, 确定了激光器处于混沌态的参数区间 $[0.51, 0.60]$ 。然后利用延时光电反馈方案实现了激光器的混沌控制。数值模拟表明, 这种方案能够实现两类不同的混沌控制。第一, 能将系统由混沌态控制到其固有的周期态, 这类控制不改变系统原有的动力学行为; 实现稳定控制以后, 控制信号可以趋近于零, 激光器的周期输出不需要控制信号来维持; 第二, 能将系统由混沌态控制到新的周期态, 这类控制改变系统原有的动力学行为; 实现稳定控制以后, 控制信号不可以趋近于零, 激光器的周期输出需要控制信号来维持。

关键词 非线性光学; 混沌控制; 延时光电反馈法; 半导体激光器

中图分类号 TN248.4; O415.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.1968

Chaotic Control in Semiconductor Laser with Time-Delayed Opto-Electronic Feedback

Wang Yanbin^{1,2} Zhang Shenghai² Mi Chaowei² Wang Wei²

¹College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²Department of Mathematics and Physics, Institute of Science, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract A method of time-delayed opto-electronic feedback control is applied to chaotic control in semiconductor laser. It can determine the parameter range of $[0.51, 0.60]$ for the laser being chaos state by plotting the system's maximal Lyapunov exponent varying with the current-modulated intensity by numerical calculation of laser's dynamic equations. And it is realized for chaotic control of the laser by the scheme of time-delayed opto-electronic feedback. Numerical stimulation shows that the scheme can achieve two kinds of different chaotic control. It can change the system from chaos into intrinsic periodic state. The controlling signal can approach zero after control achieving, and the laser's periodic outputs donot need the existence of the controlling signal. It can as well change the system from chaos into new periodic state. The controlling signal cannot approach zero after control achieving, and the laser's periodic outputs need the existence of the controlling signal.

Key words nonlinear optics; chaos control; method of time-delayed optoelectronic feedback; semiconductor laser

1 引 言

自从 1990 年 E. Ott 等^[1]提出控制混沌的参数微扰法(OGY 方法)以来, 有关混沌控制方法的研究一直受到人们的广泛关注, 相继出现了偶然比例反馈(Occasional proportional feedback, OPF)^[2]、脉

冲反馈控制、自适应控制^[3]、线性反馈控制^[4]等方法。这些方法大体上可以分为两大类: 反馈控制和非反馈控制。1992 年, Pyragas^[5]在连续系统中提出了一种简单的控制混沌方法, 即延时反馈控制法(Method of time-delayed feedback control, DFC)。

收稿日期: 2008-04-28; 收到修改稿日期: 2008-10-08

作者简介: 王彦斌(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: wangyanbin82@163.com

导师简介: 张胜海(1971-), 男, 副教授, 主要从事半导体激光器和原子分子等方面的研究。E-mail: ccstshz@163.com

这种方法的主要思路是,将原系统输出信号的一部分经过一定的延迟时间后再反馈到系统中。这种方法的突出优势是:事先不需要知道控制目标的确切信息,在物理上容易实现操作。因此,DFC 方法具有广泛的适应性。

近年来,半导体激光器^[6~9]由于制作简洁、成本低廉和易于调制等优点^[10],因此作为相干光源广泛应用于光传输和光信息处理等领域。许多学者已经从理论和实践上研究证实了半导体激光器具有复杂的动力学现象,诸如二次谐波、混沌^[11~13]、强调制下的多重态现象等。通过对激光器混沌现象的研究,能够为实现光学混沌保密通信提供必要的数值依据。而通过对激光器混沌控制的研究,能够有效地实现激光器输出由混沌态到周期态的切换,满足不同周期输出的需要。本文在 S. Rajesh 等^[14]研究工作的基础上采用延时光电反馈法实现了半导体激光器的混沌控制,不仅实现了激光器固有周期态的稳定控制,而且实现了激光器新周期态的稳定控制。然后对两类控制进行比较,跟踪计算实现控制后的控制信号的变化情况,最后选定合适的延时时间和反馈系数将激光器的混沌态完全抑制住。

2 半导体激光器的动力学模型

半导体激光器的动力学模型可以由以下方程组来描述^[14]

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{I}{I_{th}} - N - \frac{N - \delta P}{1 - \delta} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \left[\frac{N - \delta}{1 - \delta} (1 - \epsilon P) P - P + \beta N \right], \quad (2)$$

$$I = I_b + I_m \sin(2\pi f_m t), \quad (3)$$

其中 N 为载流子密度; P 为光子数密度; I 为调制电流; τ_p 和 τ_c 分别为载流子和光子的寿命; 载流子密度比 $\delta = n_0/n_{th}$, n_0 为透明载流子密度, n_{th} 为阈值载流子密度, β 为与激光模式相耦合的自发辐射因子; ϵ 为非线性增益系数; I_{th} 为激光器的阈值电流。 I_b 为偏置电流, I_m 为调制电流的振幅, f_m 为调制电流的频率。

选定调制电流频率 f_m , 把调制电流的振幅 I_m 作为控制量。为讨论方便, 设 $m = I_m / I_{th}$, 用 m 表示调制电流的强度。采用四阶龙格-库塔算法对 (1)~(3) 式进行数值计算, 所用的参数见表 1^[14]。通过对激光器动力学方程的数值求解, 绘制了激光器系统的最大李雅普诺夫 (Lyapunov) 指数 λ_{max} 随调制强度 m 的变化情况, 如图 1 所示。当调制强度为

$0.51 \leq m \leq 0.60$ 时, $\lambda_{max} > 0$ 。因此, 在此参数区间内, 激光器处于混沌态。图 2 是选取 $m = 0.55$ 时半导体激光器的奇怪吸引子和时间序列, 以下混沌控制中都选取 $m = 0.55$ 。

表 1 半导体激光器方程中的部分参数

Table 1 Parameter values of semiconductor laser's rate equations

Parameter	Value
Photon life time τ_p/s	6×10^{-12}
Electron life time τ_c/s	3×10^{-9}
Threshold current I_{th}/A	1.7×10^{-2}
Carrier density ratio δ	0.692
Bias current I_b	$1.5 I_{th}$
Modulation frequency f_m/Hz	8×10^8
Spontaneous emission factor β	5×10^{-5}
Nonlinear gain factor ϵ	10^{-4}

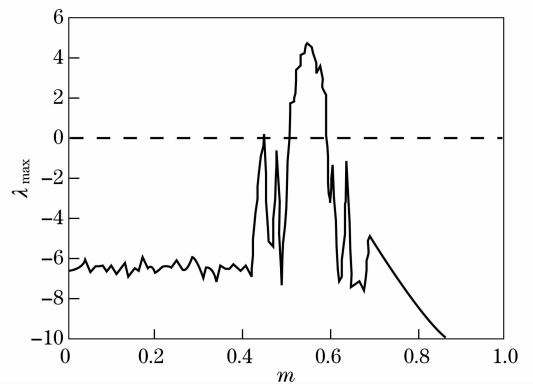


图 1 λ_{max} 随调制强度 m 的变化曲线

Fig. 1 λ_{max} changing with the modulated intensity m

3 半导体激光器的混沌控制

从混沌控制的目的来看,混沌控制可以分为两种:一种是将系统奇怪吸引子内的某个不稳定周期轨道进行稳定控制。这种控制不改变系统原有的周期轨道,即不改变系统的动力学行为,而且实现控制以后,外界输入的控制信号可以降为零。另一种是通过控制,只求得到所需的周期轨道(不一定是系统原有的轨道)或者将混沌现象抑制掉,这种控制改变原系统的动力学行为,而且实现稳定控制以后,外界输入信号不能降为零。根据这两种不同的控制目的,我们采用延时光电方案对半导体激光器进行混沌控制。

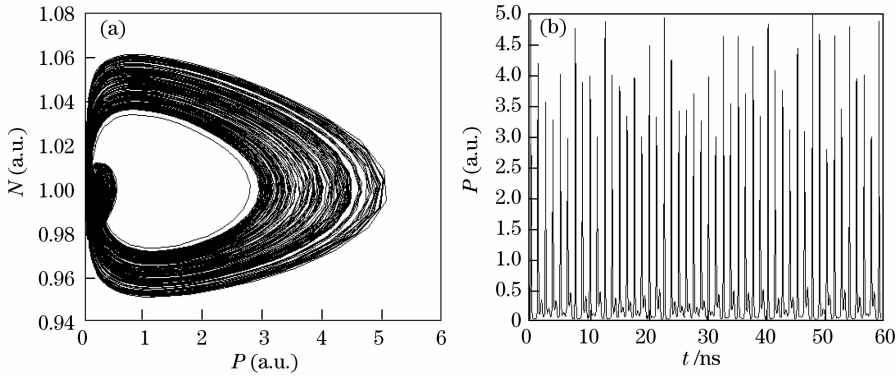


图 2 $m=0.55$ 时半导体激光器的 $P-N$ 图和时间序列

Fig. 2 $P-N$ diagram and time series of semiconductor laser with $m=0.55$

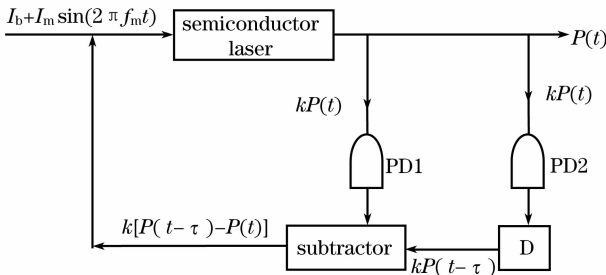


图 3 延时光电反馈方案

Fig. 3 Time-delayed optoelectronic feedback scheme

3.1 延时光电反馈方案

自行设计的延时光电反馈方案如图 3 所示。该方案的流程是：先将激光器的输出光以一定强度分别输入到光电转换器 PD1 和 PD2 转化为电信号，其中一支通过延时器 D，然后将两个电信号都输入减法器，最后将两个电信号的差值加在激光器的调制电流上。因此，调制电流形式变化为

$$I = I_b + I_m \sin(2\pi f_m t) + k[P(t - \tau) - P(t)]. \quad (4)$$

可见调制电流中增加了延时反馈项 $s(t) = k[P(t - \tau) - P(t)]$ ，而 $s(t)$ 就是实现混沌控制的控制信号，其中 k 为反馈系数， τ 是延迟时间。系统的混沌控制主要是通过调整反馈系数和延迟时间来实现的。

3.2 控制系统的固有周期态

首先确定系统的一个固有周期。设 $\Delta = \langle s(t) \rangle$ ，其中 $\langle \rangle$ 表示计算 $s(t)$ 的算术平均值。也就是说，对应一个固定的延迟时间 τ ，对某一时刻 t ，计算一个 $s(t)$ ；然后对 5000 个不同的 t 求算术平均值。如图 4 所示，做出了 Δ 随延迟时间 τ 的变化曲线，当延迟时间 τ 取 1.25 ns 或其整数倍时，控制信号 $s(t)$ 的平均值 Δ 取极小值。由混沌控制理论^[15]，在这些极小值处，延迟反馈项与系统固有不稳定周期轨道共振，将系统准确地控制到原系统的不稳定

周期轨道上去。可见， $\tau = 1.25$ ns 是原混沌系统的一个固有周期。因此，选定 $\tau = 1.25$ ns，逐渐增大反馈系数 k ，观察系统状态的变化。图 5 是固有周期态时激光器光子数密度的时间序列和吸引子在 $P-N$ 平面上的投影，图 5(a) 中，当 $k = 0.0004$ 时，系统被稳定控制到周期四态；图 5(b) 当 $k = 0.0009$ 时，系统处于周期二态；图 5(c) 当 $k = 0.0011$ 时，系统处于周期一态。对应图 2 奇怪吸引子图，可以发现这些周期态蕴含在原系统的混沌态之中，也就是说，这种控制没有改变系统原有的周期轨道，没有改变系统的动力学行为。与 S. Rajesh 等^[14] 研究工作相比，实现同样的控制效果，比如都把系统由混沌态控制到周期一态，本控制信号所需的反馈强度更小。因此，本控制方式更易于实现激光器的混沌稳定控制。

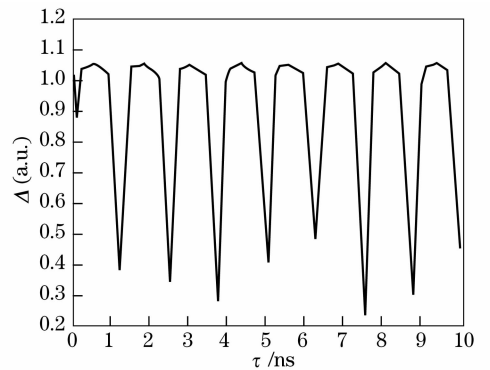


图 4 Δ 随延迟时间 τ 的变化曲线

Fig. 4 Δ changing with the delay time τ

3.3 控制新的周期态

系统由混沌态控制新的周期态，称之为新的周期态，主要是因为它不同于固有周期态。选取延迟时间 $\tau = 0.1$ ns，逐渐增大反馈系数 k ，观察系统状态的变化。图 6 为做出的新周期态激光器光子数密度的时间序列和吸引子在 $P-N$ 平面上的投影。图

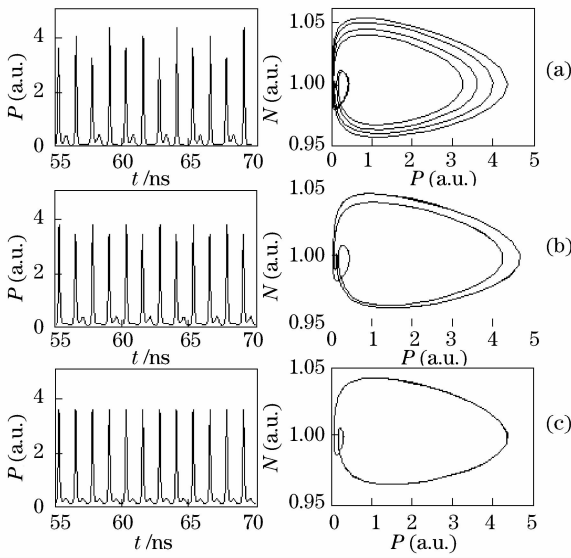


图 5 固有周期态的时间序列和 $P-N$ 图
Fig. 5 Time series and $P-N$ diagram of intrinsic periodic state

6(a)中当 $k=0.0012$ 时,系统被稳定控制到周期一态;图 6(b)中当 $k=0.0086$ 时,系统处于周期二态。可以发现这些周期态不同于图 5 所示的周期态,再对比图 2 所示的奇怪吸引子图,发现这些周期态并不蕴含在系统的混沌态之中。也就是说,这种控制改变了系统原有的周期轨道,改变系统的动力学行为,系统被控制到了新的周期态。

3.4 两种不同控制的比较

下面来观察实现混沌控制后控制信号 $s(t)$ 的变化情况。如图 7 所示,图 7(a)中采用实现图 5(c)周期一态的参数: $\tau=1.25$ ns, $k=0.0011$,数值模拟控制信号 $s(t)$ 随时间 t 的变化情况,发现混沌控制实现以后,控制信号很快趋于零,这也有力地证明了 $\tau=1.25$ ns 确实是原系统混沌态内的一个固有周期。图 7(b)中采用实现图 6(a)周期一态的参数: $\tau=0.1$ ns, $k=0.0012$,数值模拟控制信号 $s(t)$ 随着时间 t 的变化情况,发现混沌控制实现以后,控制信号不会趋于零。

可见,当延迟时间等于系统的一个不稳定固有周期时,随着控制强度的变化,可以把系统控制到不同的周期态,并且这些周期态的周期都为 τ ,当被控制到周期态后,控制信号 $s(t)$ 变为零,系统的动力学特性并不改变。当延迟时间并不等于系统的任何一个不稳定固有周期时,系统虽然也可以控制到周期态,但控制信号 $s(t)$ 始终不为零,系统的动力学特性被改变了,被控制到的周期态是新的周期态。

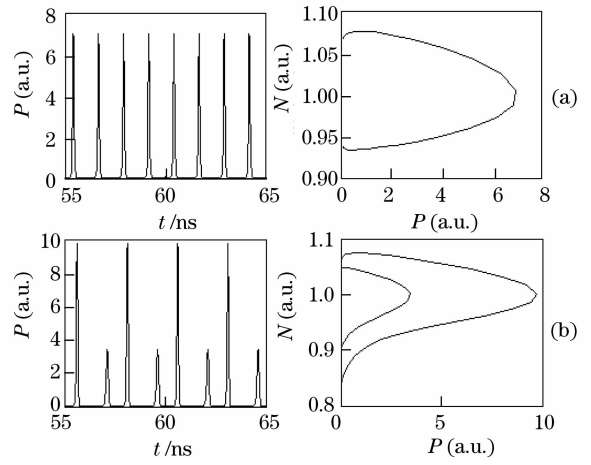


图 6 新周期态的时间序列图和 $P-N$ 图
Fig. 6 Time series and $P-N$ diagram of new periodic state

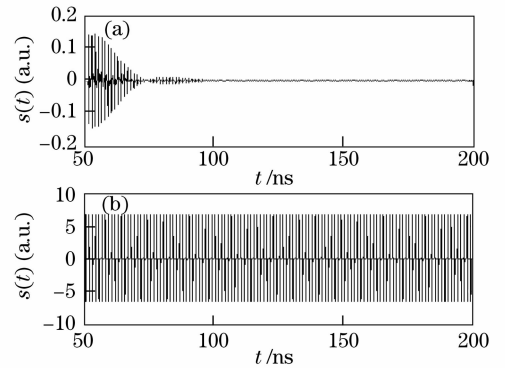


图 7 $s(t)$ 随 t 的变化曲线

Fig. 7 $s(t)$ changing with time t

3.5 系统混沌态的完全抑制

选取 $k=0.00032$, $\tau=1.25$ ns,做出此时激光器系统的最大 Lyapunov 指数 λ_{max} 随调制强度 m 的变化情况,如图 8 所示。由图可知,无论调制强度 m 取何值,最大 Lyapunov 指数 λ_{max} 都小于零,激光器系统的混沌现象完全被消除了。可见延时光电反馈法成功实现了半导体激光器的混沌控制。

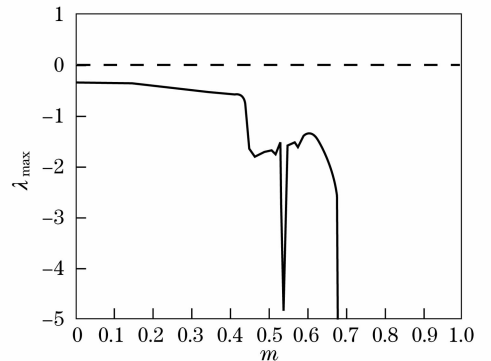


图 8 λ_{max} 随调制强度 m 的变化曲线

Fig. 8 λ_{max} changing with modulated intensity m

4 结 论

采用延时光电反馈方案实现了半导体激光器的混沌控制。数值模拟结果表明,这种方案具有两个突出的优点:首先,延时光电反馈法事先不需要采集数据来确定目标轨道,也不需要知道原系统的固有周期就能实现对混沌态的稳定控制;其次,这种方案能够实现两种不同的控制:第一,能将系统由混沌态控制到其固有的周期态,实现稳定控制以后控制信号趋近于零;这种控制不改变系统原有的周期轨道,即不改变系统的动力学特性;第二,能将系统由混沌态控制到新的周期态,实现稳定控制以后,控制信号不能趋近于零,这种控制改变了系统原有的周期轨道,即改变了系统的动力学特性。

参 考 文 献

- 1 E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke. Controlling chaos [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(11): 1196~1199
 - 2 E. R. Hunt. Stabilizing high-period orbits in a chaotic system: The diode resonator[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(15): 1953~1955
 - 3 L. Hakansson, I. Claesson, P. O. H. Stureson. Adaptive feedback control of machine-tool vibration based on the filtered-xLMS-algorithm [J]. *Journal of Low Frequency Noise & Vibration*, 1998, **17**: 199~213
 - 4 Z. Y. Yan, P. Yu. Linear feedback control, adaptive feedback control and their combination for chaos (lag) synchronization of LC chaotic systems[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2007, **33**: 419~435
 - 5 K. Pyragas. Continuous control of chaos by self-controlling feedback [J]. *Phys. Lett. A*, 1992, **170**: 421~428
 - 6 Guan Hua, Huang Guilong, Huang Xueren *et al.*. Construction of the tunable diode laser based on Littrow configuration[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 33~36
 - 7 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
 - 8 Lin Zhifeng, Gao Mingwei, Gao Chunqing. Experimental investigation of laser diode end pump Tm : YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 181~185
 - 9 Gao Xin, Bo Baoxue, Zhang Jing *et al.*. High brightness operation of fiber coupling multiplex diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1472~1475
 - 10 S. Rajesh, V. M. Nandakumaran. Control of bistability in a directly modulated semiconductor laser using delayed optoelectronic feedback[J]. *Physica D*, 2006, **213**: 113~120
 - 11 V. Bindu, V. M. Nandakumaran. Numerical studies on bidirectionally coupled directly modulated semiconductor lasers[J]. *Phys. Lett. A*, 2000, **277**: 345~351
 - 12 C. H. Lee, T. H. Yoon, S. Y. Shin. Period doubling and chaos in a directly modulated laser diode[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(1): 95~97
 - 13 Thomas Kuruvilla, V. M. Nandakumaran. Suppression of chaos through reverse period doubling in coupled directly modulated semiconductor lasers[J]. *Phys. Lett. A*, 1999, **254**: 59~64
 - 14 S. Rajesh, V. M. Nandakumaran. Suppression of chaos in a directly modulated semiconductor lasers with delayed optoelectronic feedback[J]. *Phys. Lett. A*, 2003, **319**: 340~347
 - 15 Hu Gang, Xiao Jinghua, Zheng Zhigang. *Chaos Control* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technological Education Publishing House, 2000. 34
- 胡 岗, 萧井华, 郑志刚. 混沌控制[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000. 34