

# 注入半导体激光器混沌相位周期控制方法研究

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2005 年 7 月 7 日收到, 2005 年 11 月 27 日收到修改稿)

提出外部光注入半导体激光器混沌相位控制方法, 通过周期调制注入光的相位相移将激光器的混沌控制到多种周期状态. 数值结果表明: 在不同强度光注入下 (1) 通过半波长周期相位相移调制控制混沌激光到周期态、双周期态、三周期态、四周期态以及多周期态等 (2) 通过四分之一波长周期相位相移调制控制混沌激光到周期态和多周期态, 并在高频调制控制时能够产生激光锁模现象, 其锁模区域是 19—21GHz (3) 波长周期相位相移调制控制也能使混沌激光控制到三周期态和多周期态等.

关键词: 混沌, 控制, 激光器, 周期

PACC: 0545, 4255P, 4260

## 1. 引 言

近十几年, 混沌及其应用受到了人们的广泛重视<sup>[1-6]</sup>. 因为混沌是普遍存在的一种自然现象, 其基本特性是它对初值条件极为敏感, 它的变化具有随机特点, 它的长期行为是不可以预测的. 虽然, 混沌表面上呈现无规律特性, 但却隐藏着有序的本质特点已逐渐被人们所发现. 所以人们总是期望找到一些方法来控制混沌, 以致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. 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, 自适应控制方法、反馈方法和周期扰动方法等相继被提出并实现了对各种混沌系统以及包括激光混沌系统的控制<sup>[2]</sup>.

在光通信及光器件应用中, 光注入一直受到人们的重视. 例如, 由于光注入, 副激光器激光被主激光器稳定地锁模到主激光频率上, 可以稳定激光器

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>[7-10]</sup>.

本文则研究外部光注入半导体激光器混沌相位相移周期控制方法.

## 2. 模 型

外部光注入半导体激光器系统由相同的主 ( $M$ ) 副 ( $S$ ) 分布反馈半导体激光器 (LD)<sup>[7-10]</sup> 所组成. 如图 1(a) 所示,  $M$ -LD 激光  $E_m \exp(-j\omega_m t)$  注入到 (驱动)  $S$ -LD 中, 可使其激光  $E(t) \exp\{-j[\omega t + \phi(t)]\}$  呈现出分岔、混沌等许多复杂的动力学状态<sup>[9-11]</sup>. 为了能有效地控制混沌, 设计出用相位控制器控制激光混沌的方法, 如图 1(b) 所示, 其中相位

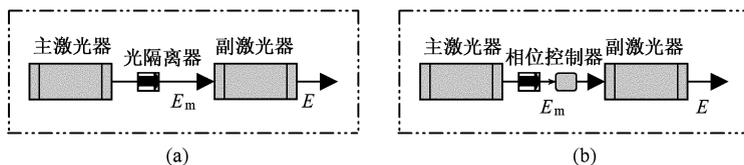


图 1 注入激光器系统模块 (a) 和注入激光器混沌相位控制系统模块 (b) ■ 是光相位控制器  $E_m$  表示注入光,  $E$  表示输出光

控制器用于控制 M-LD 注入到 S-LD 激光的相位,达到控制 S-LD 混沌的目的.相位控制器可以采用目前光纤通信中常用的 LiNbO<sub>3</sub> 晶体等电光相位调制器,利用电光效应原理,通过直接控制电光相位调制器的外部调制电压,控制其输出光场的相位相移,则 S-LD 激光的动力学方程是<sup>[9-13]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \frac{1}{2}(G - \gamma_p)E + \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(\Omega - \phi) \\ \frac{d\phi}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_L}\frac{E_m}{E} \sin(\Omega - \phi) - \Delta\omega_m \\ \frac{dN}{dt} &= \frac{I}{q} - \gamma_e N - GV_p E^2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中,  $E$  和  $\phi$  是输出激光振幅和相位,  $N$  是激光器载流子数,  $\Omega$  是激光通过相位控制器所产生的相移;

表 1 激光器参数

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

混沌周期相位相移控制方法的具体实现手段是:让相位控制器控制输出光场相位相移有正弦变化形式,如使电光相位调制器控制电压在半波电压上有正弦调制变化,相位相移就会有正弦变化形式,即使  $\Omega(t) = \pi \sin(2\pi f t)$ ,其中  $f$  是调制控制的频率.我们不妨把这种混沌周期控制称为半波长周期相位相移控制,如电光相位调制器控制电压在四分之一波长电压上有正弦调制变化,即使  $\Omega(t) = (\pi/2) \times \sin(2\pi f t)$ ,可称为四分之一波长周期相位相移控制;如电光相位调制器控制电压在一个波长电压上有正弦调制变化,即使  $\Omega(t) = 2\pi \sin(2\pi f t)$ ,可称为波长周期相位相移控制.

### 3. 数值模拟

在此,通过改变相位控制器的电压,分别采用如上三种手段,即:半波长周期相位相移控制、四分之一波长周期相位相移控制以及波长周期相位相移控

$G = (\Gamma v_g a / V) (N - N_{\text{th}}) \sqrt{1 + E^2/E_s^2}$  是模式增益,  $v_g$  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;  $N_{\text{th}} = n_{\text{th}} V$  是激光透明时的载流子数,  $n_{\text{th}}$  是它的密度值;  $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{\text{int}})$  是光子损耗速率,  $\alpha_m$  是腔光子损耗,  $\alpha_{\text{int}}$  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,  $c$  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;  $\gamma_e = A_{\text{nr}} + B(N/V) + C(N/V)^2$  是载流子非线性损耗速率,  $A_{\text{nr}}$  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.

制对注入半导体激光器的混沌控制进行模拟.数值计算过程中,对注入光相位相移的控制是在 10ns 时开始的,结果表明:在一定的混沌状态下,适当选取相位控制器的调制频率,可以将系统由混沌状态控制到多种周期状态.

首先,采用半波长周期相位相移控制的方法,即相移的变化满足关系式:  $\Omega(t) = \pi \sin(2\pi f t)$ .图 2—4 给出了系统处于某一混沌状态( $k = 0.0356$ )时,调制频率分别为:  $f = 2.55\text{GHz}$ ,  $2.234\text{GHz}$  及  $2.22121\text{GHz}$  时,系统被分别控制到单周期态、双周期态及四周期态的时序图及相空间吸引子(图 2—11 中所有(a)和(b)子图分别是时序图和相图,其中插入图和主图有相同的坐标轴).其中,图 2—4(a)及部分(b)中给出的插入图,分别表示相应的时序放大图及混沌系统本身的奇怪吸引子.

图 5—7 描述了系统处于另一种混沌状态( $k = 0.0198$ )时,选取不同的调制频率:  $f = 2.11\text{GHz}$ ,  $1.88578\text{GHz}$  及  $1.78\text{GHz}$  时,系统被分别控制到双周

期状态、三周期状态及多周期状态的情况。

从图 2—7(a)中可以发现,无论系统最初处于何种混沌状态,当它被控制到某一周期状态的过程中,都存在着一定的弛豫时间,例如,图 2(a)弛豫时间大约是 9ns,图 3(a)约 7ns,图 4(a),约 18ns,图 5(a)约 16ns,图 6(a)约 12ns,图 7(a)约 6ns,但最长不超过 20ns. 并且其相应的振荡频率非常接近于相应的调制频率。

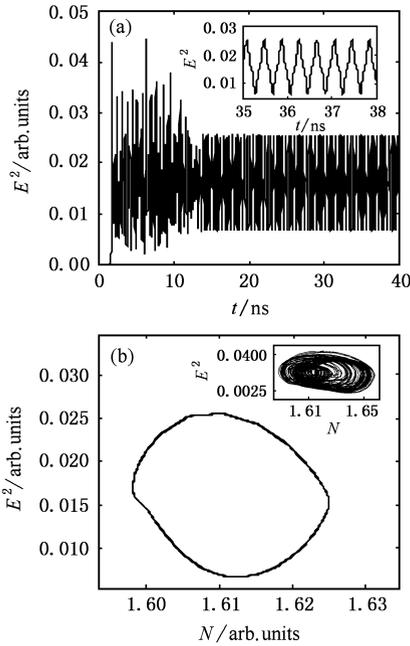


图 2 混沌被控制到周期态

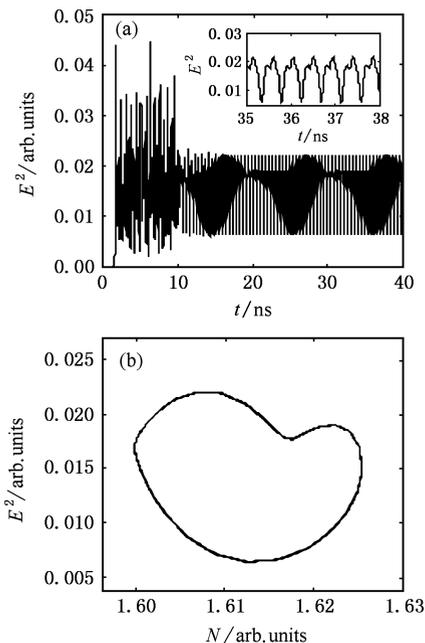


图 3 混沌被控制双周期态

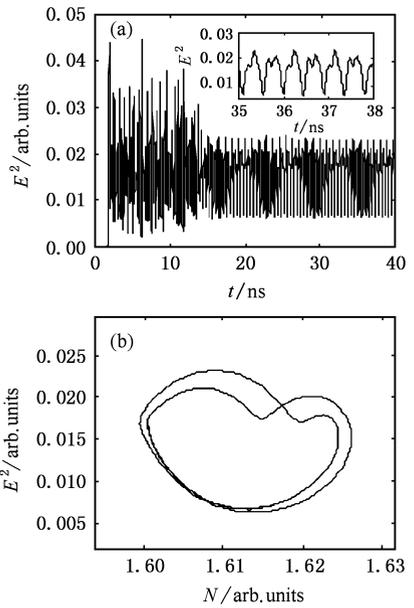


图 4 混沌被控制四周期态

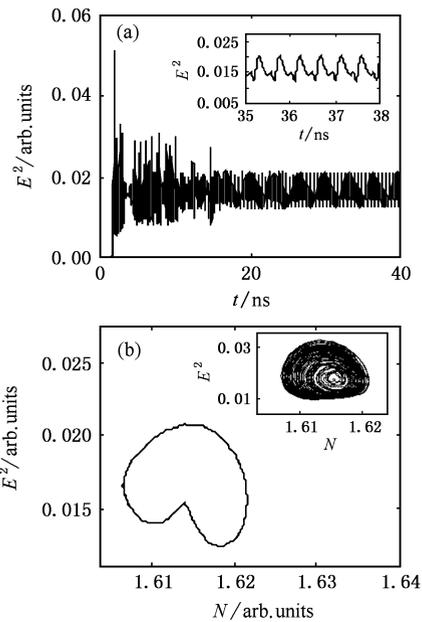


图 5 控制到双周期态

然后,采用四分之一波长周期相位相移控制的方法,即相移的变化满足关系式: $\Omega(t) = (\pi/2) \times \sin(2\pi f t)$ . 结果发现只有在调制频率  $f$  较高时,才能控制混沌到周期状态或多周期状态. 图 8 和图 9 给出了系统处于某一混沌状态( $k = 0.0198$ )时,调制频率分别为  $f = 20\text{GHz}$  及  $15.3\text{GHz}$  时,系统被分别控制到某一单周期状态及某一多周期状态的时序图及相空间吸引子情况. 从图 8 中还可以发现,激光振荡

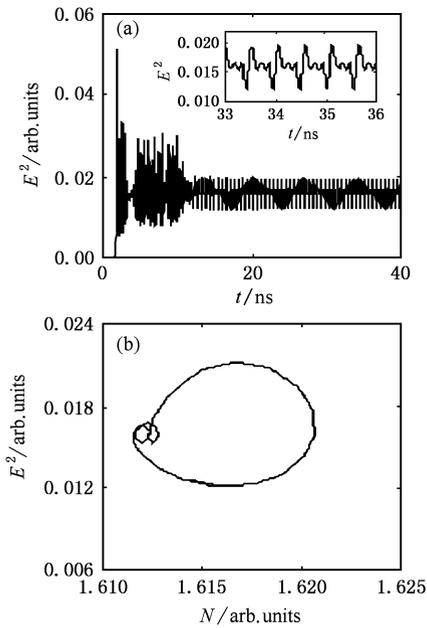


图 6 混沌被控制到三周期态

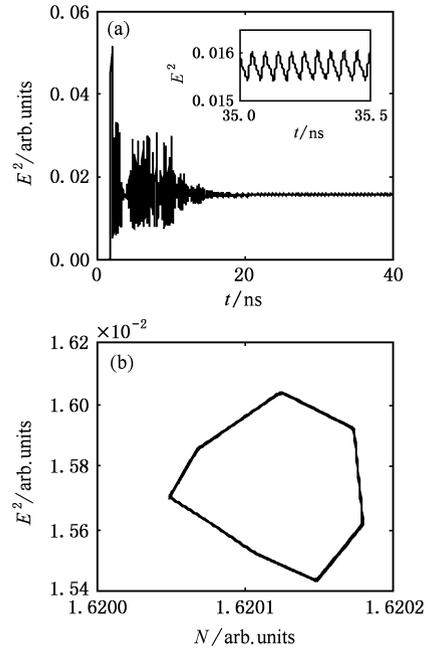


图 8 控制到某一周期态

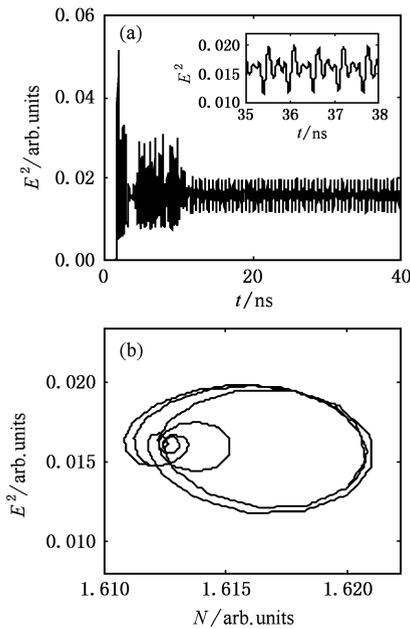


图 7 混沌被控制到多周期态

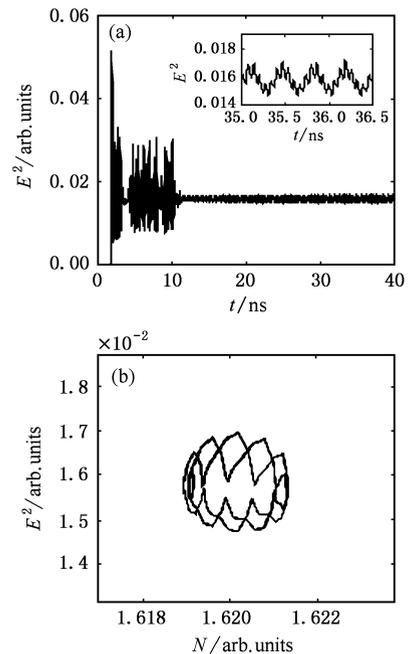


图 9 控制到某一多周期态

频率现已被控制到调制频率上,这就意味着在高频调制控制混沌到单周期状态时,能够产生激光注入锁模现象,多次数值模拟发现这个锁模区域是在 19—21GHz 之间.

最后,采用波长周期相位相移控制的方法,即相移的变化满足关系式  $\Omega(t) = 2\pi\sin(2\pi f)$ . 图 10 和图 11 给出了系统处于某一混沌状态( $k = 0.0198$ )时,

调制频率分别为  $f = 1.55\text{GHz}$  及  $1.421\text{GHz}$  时,系统被分别控制到另一个三周期状态(图 10(a)子图不是特别明显,但从图 10(b)图的极限环上可以看到有三个峰值)及另一个多周期状态的时序图及相空间吸引子的情况,可见该方法也能够实现混沌周期控制.

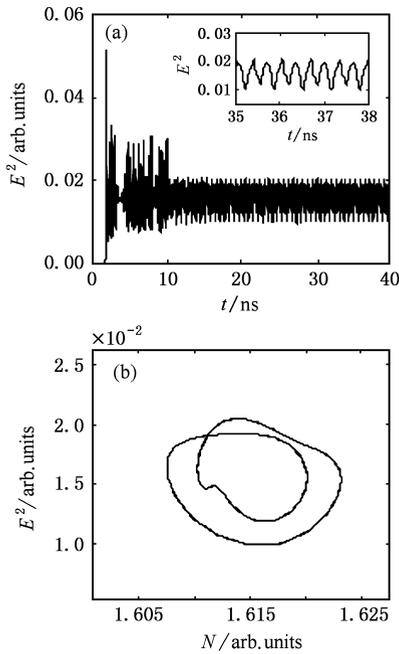


图 10 控制到另一个三周期态

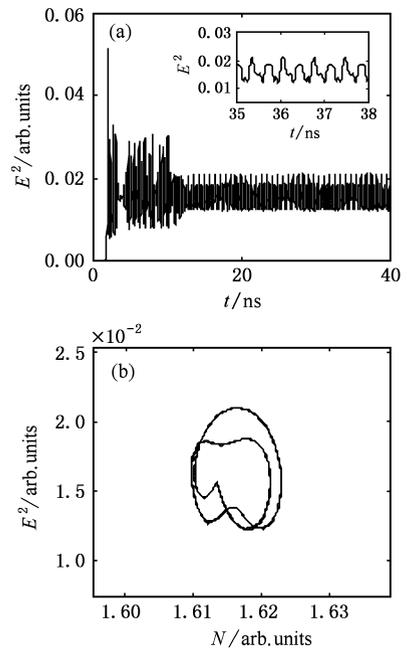


图 11 控制到另一个多周期态

## 4. 结 论

本文提出激光器混沌周期相位相移控制方法，

能够把混沌控制到单周期状态以及其它多种周期状态上。在高频调制控制混沌时，会有激光注入锁模现象产生。该控制方法对激光混沌控制及其应用研究是有意义的。

- [ 1 ] Ott E , Grebogi C , York J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [ 2 ] Simmendinger C , Hess O 1996 *Phys. Lett. A* **17** 97
- [ 3 ] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [ 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 ] Guan X P , Fan Z P , Zhang Q L *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 749 ( in Chinese ) [ 关新平、范正平、张群亮等 2002 物理学报 **51** 749 ]
- [ 6 ] Li J F , Li N , Li H *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1694 ( in Chinese ) [ 李建芬、李 农、林 辉等 2004 物理学报 **53** 1694 ]
- [ 7 ] Colet P , Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [ 8 ] Wang Y G , Ma X Y , Fu S G *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1811 ( in Chinese ) [ 王勇刚、马晓宇、付圣贵等 2004 物理学报 **53** 1811 ]
- [ 9 ] Yun L , Perter D , Yoshino T *et al* 2003 *IEEE . Quantum Electronics* **39** 269
- [ 10 ] Ramos R V , Souza R F 2001 *Opt. Commun.* **22** 90
- [ 11 ] Tang S , Liu J M 2003 *IEEE Quantum Electronics* **39** 1468
- [ 12 ] Wu L , Zhu S Q 2003 *Chinese Physics* **12** 300
- [ 13 ] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2000 ( in Chinese ) [ 颜森林 2005 物理学报 **54** 2000 ]

# Chaotic controlling via phase periodicity in optical injection semiconductor lasers

Yan Sen-Lin

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

( Received 7 July 2005 ; revised manuscript received 27 November 2005 )

## Abstract

In this paper , a method of chaotic controlling is presented via controlling the phase in semiconductor lasers under to external optical injection. Chaos can be controlled to a periodic state or multi-periodic states by periodically modulating a phase-controller to control the injection light phase. Under the conditions of different intensities of injection light , numerical results show that : ( 1 ) Chaos is controlled into periodic state , dual-periodic state , triple-periodic state , four fold-periodic state and multi-periodic state respectively by a method of half-wavelength periodic modulation ;( 2 ) Chaos can be controlled into periodic state or multi-periodic state by the method of quarter-wavelength periodic modulation. Injection-locking phenomena in laser is produced under the conditions of high frequency modulation , where the frequency-locking domain is from 19GHz to 21GHz ;( 3 ) Chaos is also controlled into periodic state and multi-periodic state by a method of a wavelength periodic modulation .

**Keywords** : chaos , controlling , laser , period

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