

空间耦合半导体激光器高维混沌系统的光反馈 增频与控制

颜森林

(南京晓庄学院物理与电子工程学院, 江苏 南京 211171)

摘要 提出了光延时反馈空间耦合半导体激光系统, 研究空间耦合两激光器在光延时反馈条件下混沌的振荡频率增强与控制, 给出了稳定频率失谐公式。研究表明: 当单激光延时反馈时, 在高水平反馈条件下, 随着反馈水平的进一步增加, 一个激光器混沌振荡频率增强效果明显, 可达到 3.57 倍, 另一个激光器混沌振荡频率增强可达到 2.86 倍; 对于混沌控制窗口, 即在低水平反馈条件下, 两激光器可被控制到单周期、双周期、三周期等。当双激光器都有光反馈时, 随着反馈程度的增加, 两激光器混沌振荡频率可被进一步增强且可分别达到 3 倍和 2.58 倍以上; 双激光器光反馈控制混沌的一个窗口也被发现, 即在弱光反馈条件下, 两激光器可被控制到单周期、双周期、三周期等。对于单个激光器光反馈系统以及双激光反馈系统从单周期模式锁定到类周期再进入混沌增频的发展路径等也给出了详细阐述。

关键词 激光器; 混沌; 控制; 频率增强; 空间耦合半导体激光器; 光反馈

中图分类号 O415.5; TP302.2; TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.0302003

Frequency Enhancement and Control of Chaos in Two Spatial Coupled Semiconductor Lasers Using Optical Feedback

Yan Senlin

(Department of Physics and Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University,
Nanjing, Jiangsu 211171, China)

Abstract A novel system of chaotic oscillation frequency enhancement and control of chaos in two spatial coupled semiconductor lasers due to optical feedback is presented. Characteristic of chaotic frequency enhancement and control of chaos in the lasers are studied and a static frequency detuning formula is given. For the case of single-laser feedback, chaotic enhancements are effectively achieved when the feedback is at high levels, in which, the strong feedback can result obviously in frequency enhancement in the dual-lasers while the frequency can be enlarged to 3.57 times of the intrinsic frequency of one laser and 2.86 times for the other. Chaos-control region is found in low feedback levels. In this region, dual-lasers can be conducted to single-cycle, dual-cycle and triple-cycle. The frequency can be enlarged to 3 times of the intrinsic frequency of one laser and 2.58 times for the other when the dual-lasers are with the feedback. Chaos-control region is also found in low feedback levels, and dual-lasers can be controlled to single-cycle, dual-cycle and triple-cycle. The developing path from single-cycle locking to quasi-cycle and then to chaotic frequency enhancement is put forward in detail when the single-feedback or the dual-feedback is present.

Key words lasers; chaos; control; frequency enhancement; spatial coupled semiconductor lasers; optical feedback

OCIS codes 140.1540; 250.5960; 230.5750

1 引 言

混沌具有对初值条件敏感的特性, 其信号具有随机变化以及类白噪声谱等特点。由于激光混沌信

号具有高的频率和宽的频谱, 因此被研究者所关注^[1~4]。目前, 构建不同的激光混沌发射系统已成为一个研究热点^[5~7]。其中光反馈或光注入半导体

收稿日期: 2012-09-24; 收到修改稿日期: 2012-10-22

作者简介: 颜森林(1962—), 男, 教授, 主要从事非线性光学、光通信、激光物理等方面的研究。

E-mail: senlinyan@163.com

激光器具有容易实现混沌激光输出和易于封装等优点,现已成为激光混沌应用领域中首选的发射器件^[5~7];例如在混沌保密通信中信号的传输速率取决于混沌载波的振荡频率或带宽^[4~6];在激光混沌测量应用中,其测量精度取决于混沌波的振荡频率^[7]。所以提高混沌波振荡频率是实现高速混沌激光保密通信或提高激光混沌测量精度的重要方法。其中注入锁定或者反馈增加激光混沌载波信号带宽方法在理论和实验方面都取得了可喜成果^[8,9],但主要是对单个激光系统进行混沌载波信号带宽增强研究。由于空间耦合半导体激光器系统比单个激光器系统有更高的维数,有更多个结构参数可作为密钥,因而具有更高的保密性能等。另外,由于混沌动力学行为极其复杂,需要寻求一些方法来控制混沌,探索其本质特性。20世纪90年代,Ott-Grebogi-York方法^[10]提出后,混沌控制方法迅速发展^[11~15]。其中激光混沌控制研究备受重视,光反馈方法、相位调制方法、周期扰动方法等多种激光混沌控制方法被提出^[11~15]。由于主要是针对单个激光混沌系统的控制或者是低维混沌系统的控制,而进行空间耦合半导体激光器高维混沌系统的控制与增强研究是非常有意义的。本文主要进行空间耦合半导体激光器混沌振荡频率增强研究,针对空间耦合两激光器系统,分别研究了单激光反馈和双激光反馈的增强与控制问题。

2 理论模型

由于耦合可使激光呈现出许多复杂的动力学状态,如分岔和混沌等,所以耦合半导体激光器混沌可以应用到保密通信或光测量等领域中。两空间耦合激光器系统的动力学行为可由激光振幅和相位耦合方程组来描述^[3~5,11~13]:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{K}{\tau_L}E_2 \cos(\phi_2 - \phi_1), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\phi_2 - \phi_1) - \Delta\omega_0, \quad (2)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2, \quad (3)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{K}{\tau_L}E_1 \cos(\phi_1 - \phi_2), \quad (4)$$

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\phi_1 - \phi_2) + \Delta\omega_0, \quad (5)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - G_2V_pE_2^2, \quad (6)$$

式中脚标“1和2”代表激光器1和2; E 和 ϕ 为激光的振幅和相位; N 为载流子数; $\Delta\omega_0$ 为两激光器的频率失谐;模式增益 $G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th})/\sqrt{1 + E^2/E_s^2}$, v_g 为激光腔内光子的群速度, a 为增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 为压缩和限制因子, V 为激光腔体积, V_p 为激光模式体积, E_s 为饱和光子场强; $N_{th} = n_{th}V$ 为激光透明时的载流子数, n_{th} 为它的密度值; $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 为光子损耗速率, α_m 为腔光子损耗, α_{int} 为内部光子损耗; $\tau_L = 2n_g L/c$ 为光在激光腔长 L 内来回一周的时间, c 为真空中的光速, $n_g = c/v_g$ 为群速折射率; I 为驱动电流, q 为单位电荷; β_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 是光耦合系数。

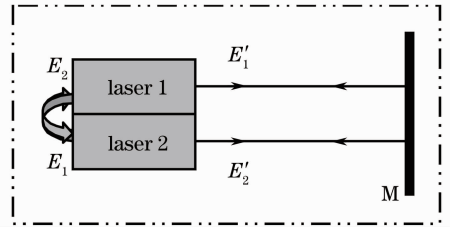


图1 光延时反馈空间耦合激光原理系统模块

Fig.1 Schematic of two spatially coupled lasers with optical delaying time feedback

为了实现该混沌系统的增强与控制,本文对该系统进行光反馈控制。方法如图1所示, E_1 和 E_2 表示两光场空间耦合, E'_1 和 E'_2 表示平面镜M将反射 E_1 和 E_2 光。若有激光分别反馈到两激光器中,则(1)~(6)式还需要增加反馈项,即(1)式变为

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{K}{\tau_L}E_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + \frac{k_1}{\tau_L}E_1(t - \tau_1) \cos[\omega\tau_1 + \phi_1(t) - \phi_1(t - \tau_1)], \quad (7)$$

式中 τ_1 为激光器1的光反馈延时时间, k_1 为光反馈系数;(2)式变为

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\phi_2 - \phi_1) - \Delta\omega_0 - \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_1(t - \tau_1)}{E_1(t)} \sin[\omega\tau_1 + \phi_1(t) - \phi_1(t - \tau_1)]; \quad (8)$$

(4)式变为

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{K}{\tau_L}E_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) + \frac{k_2}{\tau_L}E_2(t - \tau_2) \cos[\omega\tau_2 + \phi_2(t) - \phi_2(t - \tau_2)], \quad (9)$$

式中 τ_2 为激光器 2 的光反馈延时时间, k_2 为光反馈系数; (5) 式变为

$$\frac{d\phi_2}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\phi_1 - \phi_2) + \Delta\omega_0 - \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_2(t - \tau_2)}{E_2(t)} \sin[\omega\tau_2 + \phi_2(t) - \phi_2(t - \tau_2)]. \quad (10)$$

这样由(1)~(10)式构成了两耦合激光器混沌的增频与控制动力学系统。为了简单了解其原理, 仅分析一下不动点的特点。若无反馈, 两激光器稳态条件是

$$E_{20}^2 [\beta_c \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) + \sin(\phi_{20} - \phi_{10})] + E_{10}^2 [\beta_c \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) - \sin(\phi_{20} - \phi_{10})] = 0, \quad (11)$$

式中 $E_{10,20}$ 和 $\phi_{10,20}$ 是不动点。若有反馈光时, 由(1)~(10)式可以得到两耦合激光器频率失谐:

$$\Delta\omega = \beta_c \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{20}}{E_{10}} \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{20}}{E_{10}} \sin(\phi_{20} - \phi_{10}) - \frac{k_1}{\tau_L} \sin(\omega\tau_1), \quad (12)$$

或者

$$-\Delta\omega = \beta_c \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{10}}{E_{20}} \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) - \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{10}}{E_{20}} \sin(\phi_{20} - \phi_{10}) - \frac{k_2}{\tau_L} \sin(\omega\tau_2). \quad (13)$$

由于混沌系统对参数变化以及对外界影响极其敏感, 当有光延时反馈时, 两激光器的线宽增强因子或模式增益及频率失谐易受到反馈光的影响, 其激光相位及频率也将随着反馈光变化而发生变化, 这就是光反馈提高混沌频率方法的物理机制。同时, 由于光反馈, 激光强度将受到影响, 当 τ_1, τ_2, k_1 和 k_2 发生变化时, 混沌动力学行为也将发生调整变化, 多参数控制混沌激光就有可能实现。

3 单激光反馈结果

3.1 激光器 1 光反馈增强混沌振荡频率特点

表 1 为两激光器参量。图 2 是没有反馈时两激光器的输出特性, 激光器 1 混沌振荡频率是 2.8 GHz, 激光器 2 混沌振荡频率是 3.2 GHz。当激光器 1 有反馈光时, 反馈参数取 $k_1 = 0.18$ 和 $\tau_1 = 2$ ns。图 3 中激光器 1 混沌振荡频率是 6.9 GHz, 激光器 2 混沌振荡频率是 7.1 GHz, 即激光器 1 混沌振荡频率增加到没有反馈时的 2.46 倍以上, 激光器 2 混沌振荡频率增加到 2.21 倍以上, 且两激光频谱向高频区域移动。这说明光反馈扩频效果是有效的。

表 1 激光器参量

Table 1 Laser parameters

Parameter	Value
Active cavity length $L / \mu\text{m}$	350
Active cavity width $w / \mu\text{m}$	2
Active cavity thickness $d / \mu\text{m}$	0.15
Mode confinement factor Γ	0.29
Group refractive index n_g	3.8
Cavity and internal loss $(\alpha_m + \alpha_{\text{int}}) / \text{cm}^{-1}$	49
Nonradiative recombination rate $A_{\text{nr}} / \text{s}^{-1}$	1.0×10^8
Radiative recombination coefficient $B / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	1.2×10^{-10}
Auger recombination coefficient $C / (\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1})$	3.5×10^{-29}
Optical field amplitude at saturation $E_s / \text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
Gain constant α / cm^2	2.3×10^{-16}
Linewidth enhancement factor β_c	6
Frequency detuning $\Delta\omega_0 / \text{GHz}$	1
Carrier density at transparency $n_{\text{th}} / \text{cm}^{-3}$	1.2×10^{18}
Coupling factor K	0.05
Drive current I_1 / mA	24
Drive current I_2 / mA	26

图 4 是有光反馈激光器混沌振荡频率与无光反馈时激光器混沌振荡频率的比值随光反馈水平的变化, 从图中可以发现在强反馈条件下, 随着反馈强度的增加, 激光器 1 和 2 的混沌振荡被进一步增强, 且

激光器 2 频率增强更加有效, 最大可达 3.57 倍。

取 $\tau_1 = 1$ ns 时, 两激光器混沌振荡频率增强比值随光反馈水平的变化情况如图 5 所示。从图 5 中可以发现在强反馈条件下, 激光器 1 和 2 混沌振荡将被

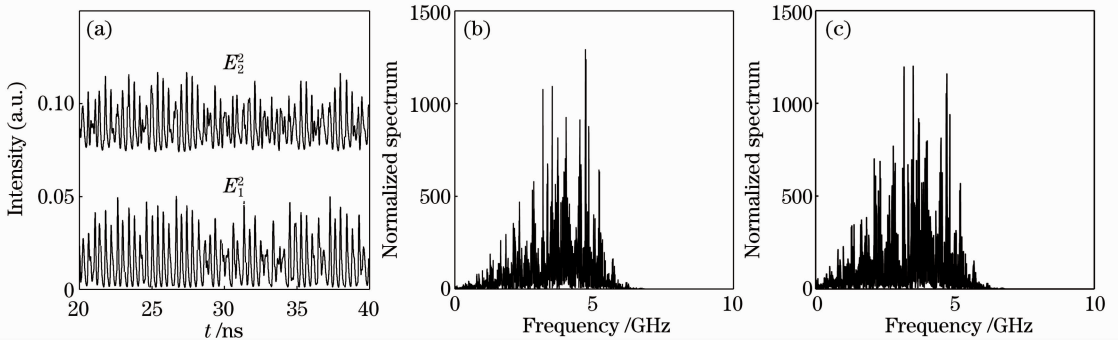


图 2 两耦合激光器的输出特性。(a)两激光强度分布;(b)激光器 1 频谱;(c)激光器 2 频谱

Fig. 2 Coupled lasers output performance. (a) Intensities of lasers 1 and 2; (b) spectrum of laser 1; (c) spectrum of laser 2

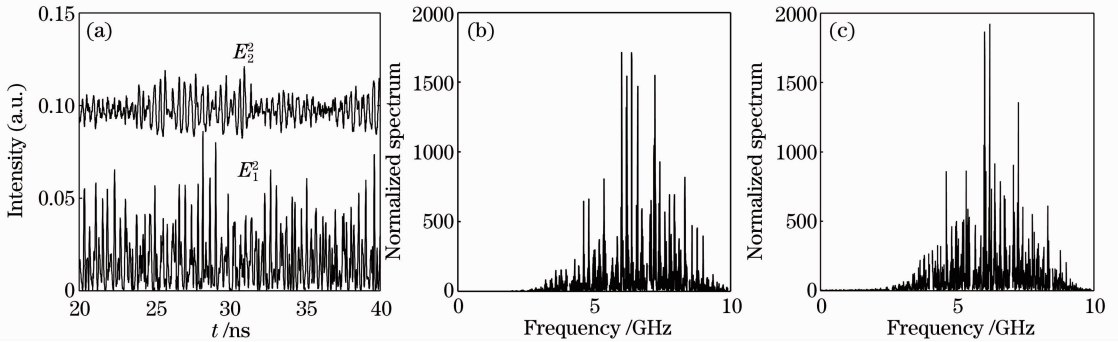


图 3 激光器 1 有光反馈时两激光器的输出特性。(a)两激光强度分布;(b)激光器 1 频谱;(c)激光器 2 频谱

Fig. 3 Coupled lasers output performance when laser 1 is with the feedback. (a) Intensities of lasers 1 and 2; (b) spectrum of laser 1; (c) spectrum of laser 2

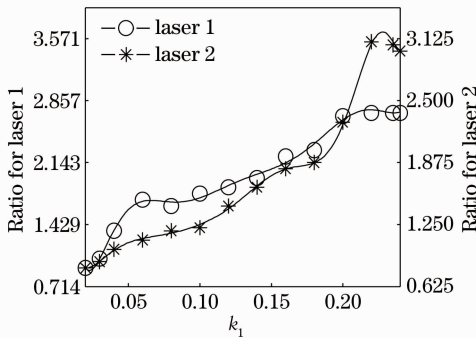


图 4 两激光器混沌振荡频率增强比值随激光器 1 反馈水平的变化情况

Fig. 4 Ratio of chaotic oscillation frequency enhancement of dual-lasers versus k_1

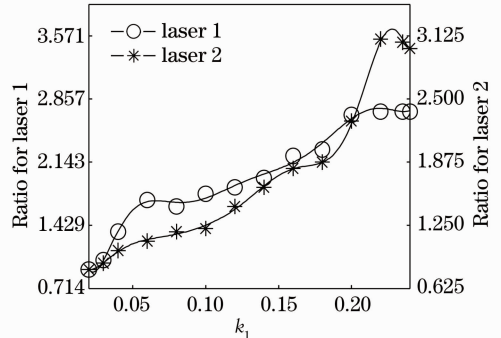


图 5 两激光器混沌振荡频率增强比值随激光器 1 光反馈水平的变化情况 ($\tau_1 = 1 \text{ ns}$)

Fig. 5 Ratio of chaotic oscillation frequency enhancement of dual-lasers versus k_1 ($\tau_1 = 1 \text{ ns}$)

进一步增强,其中激光器 1 频率增强最大可达 2.86 倍,激光器 2 频率增强更加有效,最大可达 3.5 倍。

3.2 激光器 1 光反馈控制混沌以及混沌发展路径

若光反馈较弱,激光混沌可以被有效控制。这种情况和通常的光反馈半导体激光器特性相反^[4~6]。当 $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ 时,控制混沌的区域 k_1 为 0.005~0.014。当 $k_1 = 0.005$ 时,图 6 显示两激光器可控制到不同的单周期态上,且两频率锁定为

2.55 GHz。当 $k_1 = 0.0127$ 时,图 7 显示两激光器可控制到不同的双周期态。当 $k_1 = 0.01$ 时,图 8 显示两激光器可控制到两个不同的三周期态上。随着 k_1 值的增加,激光器会逐步向多周期态或者无衰减振荡演化。

混沌激光器 1 和 2 随光反馈水平增加的发展(单周期控制、多周期产生、混沌扩频等)路径为当 k_1 从 0.003 增加到 0.007 时,两激光器能控制到单

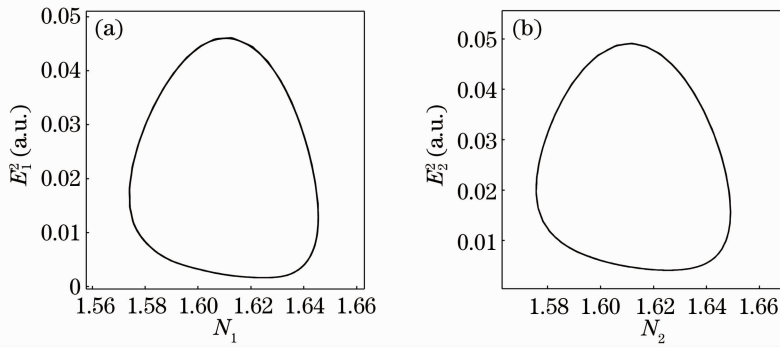


图 6 两激光器被控制到不同的单周期态上。(a)激光器 1 的相轨迹;(b)激光器 2 的相轨迹

Fig. 6 Dual-lasers controlled to different single-cycle states. (a) Trajectory of laser 1; (b) trajectory of laser 2

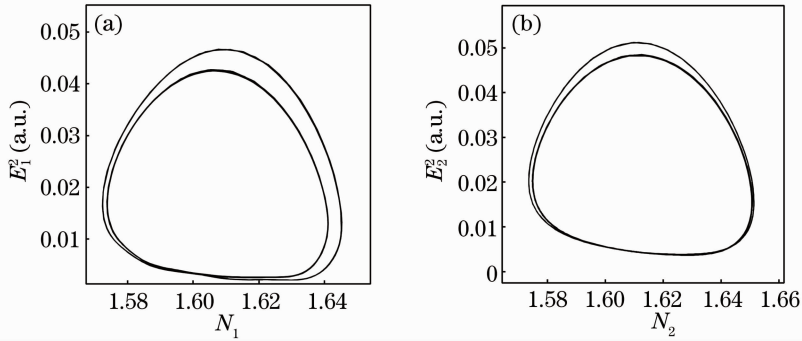


图 7 两激光器被控制到不同的双周期态上。(a)激光器 1 的相轨迹;(b)激光器 2 的相轨迹

Fig. 7 Dual-lasers controlled to different dual-cycle states. (a) Trajectory of laser 1; (b) trajectory of laser 2

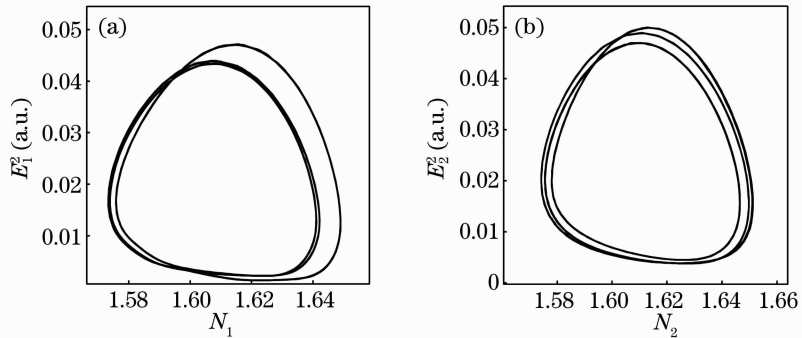


图 8 两激光器被控制到不同的三周期态上。(a)激光器 1 的相轨迹;(b)激光器 2 的相轨迹

Fig. 8 Dual-lasers controlled to different triple-cycle states. (a) Trajectory of laser 1; (b) trajectory of laser 2

周期态;当 k_1 从 0.008 增加到 0.012 时,两激光器能控制到三周期态;当 k_1 从 0.0124 增加到 0.0128 时,两激光器能控制到双周期态;当 k_1 从 0.0129 增加到 0.013 时,两激光器呈现无衰减振荡;当 k_1 从 0.0131 继续增加到 0.015 时,两激光器能控制到单周期态;当 k_1 从 0.016 增加到 0.018 时,两激光器能控制到双周期态;当 k_1 增加到 0.019 时,两激光器呈现出不稳定状态,当 k_1 继续增加时,激光进入混沌状态,并且随着 k_1 的增加,激光混沌振荡频率会逐步增强,混沌扩频效果也越来越明显。

3.3 激光器 2 光反馈情况

当激光器 2 有光反馈情况时,若取 $\tau_2 = 1$ ns,可

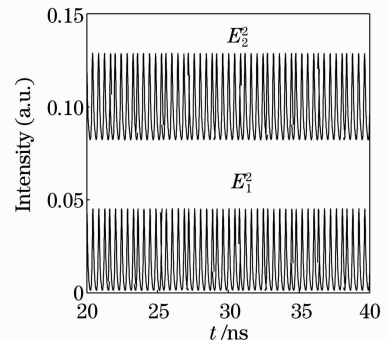


图 9 两激光器周期脉动情况

Fig. 9 Dual-lasers pulse

以发现混沌激光器 1 和 2 随光反馈水平增加的动力学发展路径。其中, k_2 从 0.0035 增加到 0.01 时, 两激光器能控制到单周期态, 图 9 显示 $k_2=0.01$ 时两激光器能控制到单周期情况, 两激光器输出周期频率为 2.5 GHz。如果继续增加 k_2 , 两激光器会进入不稳定状态; 当 k_2 从 0.02 逐步增加到 0.26 时, 两激光器进入混沌状态; 随着 k_2 的增加, 混沌振荡频率逐步增强。图 10 是两激光器混沌振荡频率增强比值随激光器 2 光反馈水平增加而增强的变化情况。

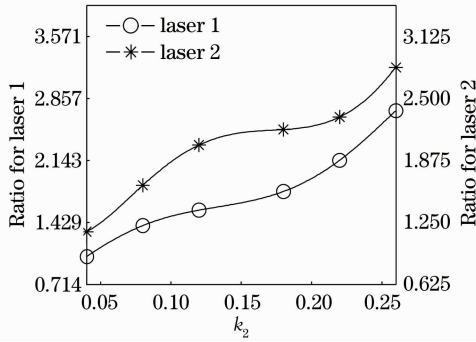


图 10 两激光器混沌振荡频率增强比值随激光器 2 光反馈水平的变化情况

Fig. 10 Ratio of chaotic oscillation frequency enhancement of dual-lasers versus k_2

4 双反馈结果

当两激光器同时有光反馈时, 图 11 显示两激光器混沌振荡频率增强比值随反馈强度增加的特点, 其中取 $\tau_1=\tau_2=\tau=0.8$ ns, $k_1=k_2=k$ 且从 0.01 逐步增加到 0.26。随着光反馈水平的增加, 激光器 1 频率会从 2.8 GHz 逐步增加到 8.5 GHz(3 倍), 激光器 2 频率会从 3.6 GHz 逐步增加到 9.8 GHz (2.58 倍)。即在高水平光反馈条件下, 随着反馈水平的增加, 两激光器混沌振荡会进一步增强。

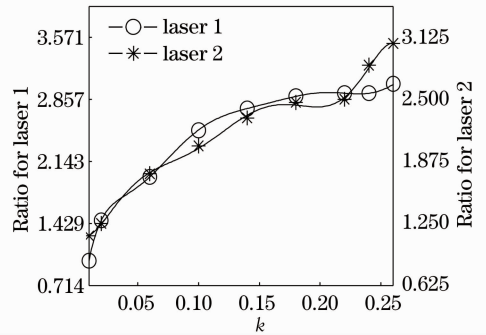


图 11 两激光器混沌振荡频率增强比值随光反馈水平的变化($\tau=0.8$ ns)

Fig. 11 Ratio of chaotic oscillation frequency enhancement of dual-lasers versus k ($\tau=0.8$ ns)

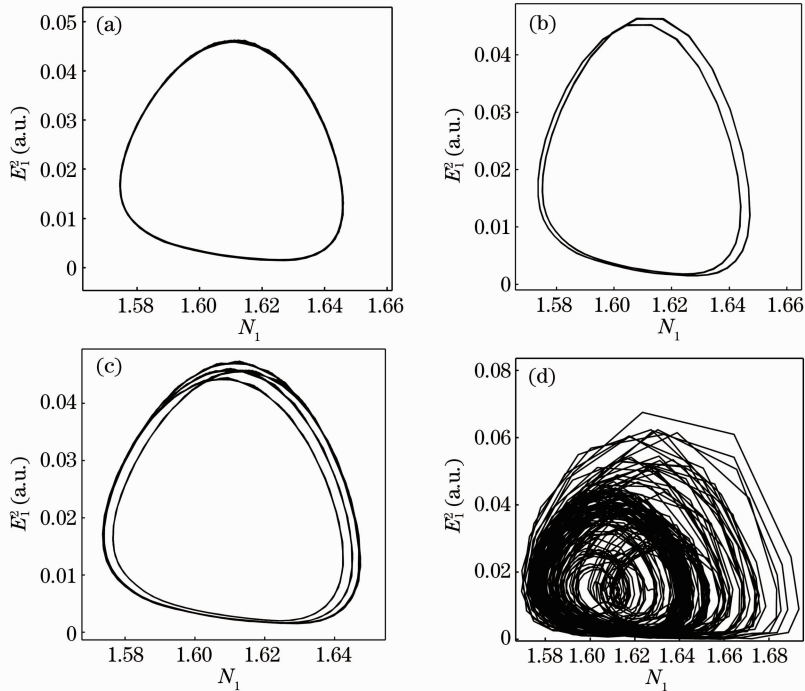


图 12 激光器 1 出现的相轨迹。(a)单周期($k=0.003$);(b)双周期($k=0.0045$);(c)三周期($k=0.005$);(d)混沌吸引子($k=0.01$)

Fig. 12 Trajectories for laser 1. (a) Single-cycle ($k=0.003$); (b) dual-cycle ($k=0.0045$); (c) triple-cycle ($k=0.005$); (d) chaotic attractor ($k=0.01$)

激光器 1 和 2 随反馈水平增加的一个动力学发展路径为：取 $\tau_1 = \tau_2 = \tau = 0.6 \text{ ns}$ ，使 $k_1 = k_2 = k$ ，当 k 从 0.002 增加到 0.004 时，两激光器能控制到单周期态且出现模式锁定形式；当 k 从 0.0043 增加到 0.0047 时，两激光器能控制到双周期态；当 $k = 0.005$ 时，两激光器能控制到三周期态； k 从 0.0055 增加到 0.008 时，两激光器呈现无衰减振荡；当 k 继续增加时，激光进入混沌状态。图 12 为激光器 1 动力学路径上出现的单周期、双周期、三周期及混沌态轨迹。同时随着 k 的增加，激光混沌振荡频率会逐步增强，混沌扩频效果也越来越明显。图 13 为两激光器混沌振荡频率增强比值随光反馈水平的变化情况，其中激光器 1 频率可增加到 8.7 GHz (2.72 倍)，激光器 2 频率可增加到 9.87 GHz (3 倍)。

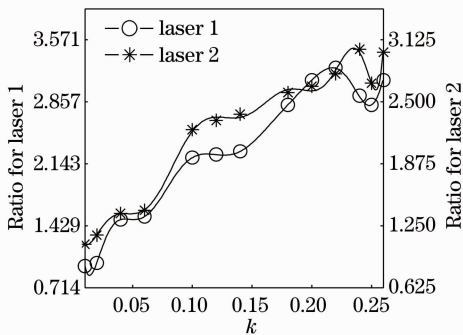


图 13 两激光器混沌振荡频率增强比值随光反馈水平的变化 ($\tau = 0.6 \text{ ns}$)
 Fig. 13 Ratio of chaotic oscillation frequency enhancement of dual-lasers versus k ($\tau = 0.6 \text{ ns}$)

5 结 论

研究了光反馈空间耦合半导体激光器系统，给出了稳定频率失谐公式，指出了混沌振荡频率增强和控制的物理机制；指明了随反馈水平增加的激光系统从单周期模式锁定到类周期变化最后发展到混沌增强的路径；指出高水平光反馈能非常有效地增强激光器混沌振荡；给出了控制混沌到周期及类周期的窗口等。研究空间耦合半导体激光器高维系统的混沌振荡频率增强和控制方法，对高维混沌系统特别是高维激光混沌系统的增频和控制是非常有意义的，对进一步研究耦合激光系统和新型光反馈激光系统^[16~18]的应用也具有一定的参考价值。

参 考 文 献

1 G. D. Van Wiggeren, R. Roy. Communication with chaotic lasers[J]. *Science*, 1998, **279**(5354): 1198~1200
 2 L. Wu, S. Q. Zhu. Communications using multi-mode laser system based chaotic synchronization[J]. *Chinese Physics*, 2003, **12**(3): 300~304

3 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
 4 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
 5 Yan Senlin. High rate chaos secure communication 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
 6 P. Li, J. G. Wu, Z. M. Wu *et al.*. Bidirectional chaos communication between two outer semiconductor lasers coupled mutually with a central semiconductor laser[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(24): 23921~23931
 7 Gong Tian'an, Wang Yuncai, Kong Lingqin *et al.*. Chaotic lidar for automotive collision warning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2426~2430
 龚天安, 王云才, 孔令琴等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2426~2430
 8 A. B. Wang, Y. C. Wang, J. F. Wang. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1144~1146
 9 Zhao Yanfeng. Chaotic characteristics of the semiconductor laser with double external cavity optical feedback[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6058~6062
 赵严峰. 双反馈半导体激光器的混沌特性研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6058~6062
 10 E. Ott, C. Grebogi, J. A. York. Controlling chaos[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(11): 1196~1199
 11 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
 12 N. Kikuchi, Y. Liu, J. Ohtsubo. Chaos control and noise suppression in external-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1): 56~65
 13 R. Chacon, J. D. Bejarano. Routes to suppressing chaos by weak periodic perturbations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(19): 3103~3106
 14 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
 15 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
 16 Zhang Yuanfang, Yang Lingzhen. Theoretical and experimental study of chaos generation with single optical feedback in the He-Ne laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0102003
 张元芳, 杨玲珍. 单反馈 He-Ne 激光器混沌激光产生的理论及实验研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0102003
 17 Zhang Mingjiang, Liu Tiegeng, Zheng Jianyu *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405002
 张明江, 刘铁根, 郑建宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405002
 18 Li Xiaojian, Wu Zhengmao, Deng Tao *et al.*. Investigation on the bistability performances of vertical-cavity surface-emitting lasers with time-varying orthogonal optical injection subject to weak optical feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1214001
 李小坚, 吴正茂, 邓 涛等. 弱光反馈下正交时变光注入 VCSEL 的双稳特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1214001