

外部光注入空间耦合半导体激光器高维混沌系统的增频与控制研究

颜森林[†]

(南京晓庄学院物理与电子工程学院, 南京 211171)

(2011年12月19日收到; 2012年1月29日收到修改稿)

提出外部光注入空间耦合半导体激光器系统, 研究外部光注入两激光器混沌振荡频率增强以及混沌控制等特点, 给出稳定频率失谐公式. 研究表明, 当单激光器注入时, 注入激光器呈现出三个混沌扩频区域; 发现在强激光注入条件下, 随着注入程度的增加, 注入激光器混沌振荡频率增强非常有效且可达到 3.5 倍以上 (尽管另一个激光器频率会缓慢下降); 随着注入光正频率失谐的增加, 两激光器混沌振荡都能进一步增强; 发现混沌控制窗口, 即在弱注入条件下两激光器可以被控制到单周期、双周期、四周期、六周期等. 当双激光器注入时, 随着注入程度的增加, 两激光器混沌振荡频率进一步增加, 且可达到 3.5 倍和 2.65 倍以上; 随着注入光正频率失谐增加, 两激光器混沌振荡频率增加. 双激光器注入控制混沌的一个窗口也被发现: 即在强注入条件下两激光器可以被控制到单周期、三周期、六周期等. 最后详细给出了单激光注入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以及双激光注入系统从混沌到类周期再进入单周期模式锁定的演化控制路径等.

关键词: 混沌, 控制, 频率增强, 空间耦合半导体激光器

PACS: 05.45.Jn, 05.45.Pq, 42.55.Px

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和具有类白噪声谱特点等^[1,2]. 近年来, 混沌及其在保密通信等方面的应用越来越受到人们的重视. 激光混沌信号具有高的频率和宽的频谱, 更为研究者所关注, 利用不同的激光系统实现混沌保密通信已成为一个研究热点^[3-9]. 其中光反馈或光注入半导体激光器具有容易实现混沌激光输出和易于封装等优点, 已成为激光混沌保密通信中载波发射机和接收机的首选器件^[10-16]. 在保密通信中, 数据高速传输是最为核心的技术指标之一. 而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, 所以提高混沌载波频率是实现高速混沌激光保密通信的重要方法, 其中注入锁定增加激光混沌载波信号带宽方法在理论和实验上都取得了可喜成果^[15-20], 其中主要是对单个激光系统进行混沌载波信号带宽增强研究. 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,

由于空间耦合半导体激光器系统比单个激光系统有更高的维数, 有更多个结构参数可作为密钥, 因此具有更高的保密性能等. 本文第二个研究方面是进行空间耦合半导体激光器系统混沌控制技术研究. 由于混沌变化极其复杂, 其背后隐藏着有序的本质特性现已逐渐被发现. 人们总是期望找到一些方法来控制混沌. 20世纪90年代, Ott-Grebogi-York方法提出后^[21], 混沌控制方法迅速发展^[22-24]. 其中激光混沌控制及应用研究备受重视, 提出了多种激光混沌控制方法, 如光反馈方法、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^[22-25]. 然而, 这些研究主要是针对单个激光系统进行混沌控制或者低维系统的混沌控制. 所以, 进行空间耦合半导体激光器高维系统的混沌增频与控制研究是非常有意义的.

2 理论模型

空间耦合半导体激光器系统已被广泛研究, 耦

[†] E-mail: yansenlinsh@sina.com

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^[25-27]. 耦合半导体激光器混沌可以应用到保密通信和光计算中^[6-9,25-27]. 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^[6-9,25-27]:

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

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

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2, \quad (1c)$$

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

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

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - G_2V_pE_2^2, \quad (1f)$$

其中, 脚标“1 和 2”代表激光器 1 和 2; E 和 ϕ 是激光的振幅和相位; N 是载流子数; $\Delta\omega_0$ 是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 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; $N_{th} = n_{th}V$ 是激光透明时的载流子数, n_{th} 是它的密度值; $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 是光子损耗速率, α_m 是腔光子损耗, α_{int} 是内部光子损耗; $\tau_L = 2n_g L/c$ 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; β_c 是光线宽增强因子; $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 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 是光耦合系数.

为了实现混沌的增频与控制, 设计方案是对该系统进行外部光注入. 如有激光 E_m 分别注入到两激光器中, 则方程组 (1) 还要增加外部光注入项. 其中, (1a) 式右边再增加

$$+ \frac{k_1}{\tau_L} E_m \cos[\phi_1(t)], \quad (2a)$$

其中, k_1 是光注入系数. (1b) 式右边再增加

$$- \Delta\omega_1 - \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_m}{E_1(t)} \sin[\phi_1(t)], \quad (2b)$$

其中, $\Delta\omega_1$ 是注入光和激光器 1 光场的频差. (1d)

式右边再增加

$$+ \frac{k_2}{\tau_L} E_m \cos[\phi_2(t)], \quad (2d)$$

其中, k_2 是光注入系数. (1e) 式右边再增加

$$- \Delta\omega_2 - \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_m}{E_2(t)} \sin[\phi_2(t)], \quad (2e)$$

其中, $\Delta\omega_2$ 是注入光和激光器 2 光场的频差. 这样由方程组 (1) 和 (2) 构成了耦合激光器混沌增频或控制动力学系统. 为了简单了解其原理, 仅分析一下不动点的特点. 如无外部注入, 两激光器稳态模式锁定条件是:

$$E_{20}^2[\beta_c \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) + \sin(\phi_{20} - \phi_{10})] + E_{10}^2[\beta_c \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) - \sin(\phi_{20} - \phi_{10})] = 0, \quad (3)$$

其中 $E_{10,20}$ 和 $\phi_{10,20}$ 是不动点. 如有外部注入光时, 由 (1) 和 (2) 式得到两耦合激光器频率失谐:

$$\Delta\omega = \Delta\omega_1 + \beta_c \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{20}}{E_{10}} \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{20}}{E_{10}} \sin(\phi_{20} - \phi_{10}) - \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{10}} \sin \phi_{10}, \quad (4a)$$

或

$$- \Delta\omega = \Delta\omega_2 + \beta_c \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{10}}{E_{20}} \cos(\phi_{20} - \phi_{10}) - \frac{K}{\tau_L} \frac{E_{10}}{E_{20}} \sin(\phi_{20} - \phi_{10}) - \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{20}} \sin \phi_{20}. \quad (4b)$$

由于混沌系统对参数变化以及外界影响极其敏感, 当有外部光注入时, 两激光器的线宽增强因子及频率失谐易受到外部注入光的影响, 其激光相位及频率也将随着注入光变化而发生变化, 这就是外部光注入提高混沌频率方法的物理机理. 同时, 由于外部光注入, 激光强度将受到影响, 当 $\Delta\omega_{1,2}$ 以及 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, 激光多参数方法控制混沌就有可能实现.

3 单个激光器注入结果

3.1 激光混沌振荡频率增强特点

两激光器参量列在表 1 中. 图 1 是没有外部注入时两激光器输出的激光波形和功率频谱, 其中激

激光器 1 混沌振荡频率是 2.9 GHz, 另一个是 3.7 GHz. 当有外部光注入到激光器 1 且注入参数取 $k_1 = 0.2$ 和 $\Delta\omega_1 = 1$ GHz 时, 图 2(a) 和 (c) 显示激光器 1 混沌振荡频率是 10.2 GHz, 另一个是 3.9 GHz. 可见激光器 1 在外部光注入后, 其混沌振荡频率增加了 3.5 倍以上, 激光器 1 混沌振荡频率增加是非常明显的, 说明注入扩频效果是非常显著的 (图 2 (b) 也说明这一点). 我们详细研究了两激光器混沌振荡频率随注入水平的变化情况. 图 3 是两激光器振荡频率随外部注入水平的变化. 可以发现在强激光注入条件下, 随注入强度的增加, 注入激光器混沌振荡被进一步增强, 而另一个激光器频率变化缓慢. 我们发现了激光器 1 混沌扩频的三个区域:

第一区域是 k_1 在 0.02—0.03 之间; 第二区域是 k_1 在 0.05—0.08 之间; 第三区域是 k_1 在 0.1—0.36 之间. 其中, 第一区域是随着 k_1 值增加, 激光器 1 频率会从 3.6 GHz 逐步增加到 4.6 GHz, 激光器 2 频率会从 3.4 GHz (已小于 3.7 GHz) 逐步增加到 4.2 GHz. 第二区域是随着 k_1 值增加, 激光器 1 频率会从 5.1 GHz 逐步增加到 6.2 GHz, 激光器 2 频率会从 4.3 GHz 缓慢变化到 4.6 GHz. 这两个区域, 两激光器频率随着激光注入水平逐步增加. 第三区域是随着 k_1 值增加, 激光器 1 频率会从 7.9 GHz 逐步增加到 13.8 GHz, 激光器 2 频率会从 4.5 GHz 缓慢减到 3.5 GHz. 可以发现在第三区域, 激光器 1 频率增强更加有效.

表 1 激光器参量

参量	值	参量	值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350	饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2	增益常数 α/cm^2	2.3×10^{-16}
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15	光线宽增强因子 β_c	6
压缩和限制因子 Γ	0.29	频率失谐 $\Delta\omega_0/\text{GHz}$	1
群速折射率 n_g	3.8	激光透明时载流子密度 $n_{\text{th}}/\text{cm}^{-3}$	1.2×10^{18}
光子损耗 $(\alpha_m + \alpha_{\text{int}})/\text{cm}^{-1}$	49	注入光场强 E_m	$0.25E_s$
非辐射复合速率 $A_{\text{nr}}/\text{s}^{-1}$	1.0×10^8	光耦合系数 K	0.08
辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1.2×10^{-10}	驱动电流 I_1/mA	25
俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5×10^{-29}	驱动电流 I_2/mA	27

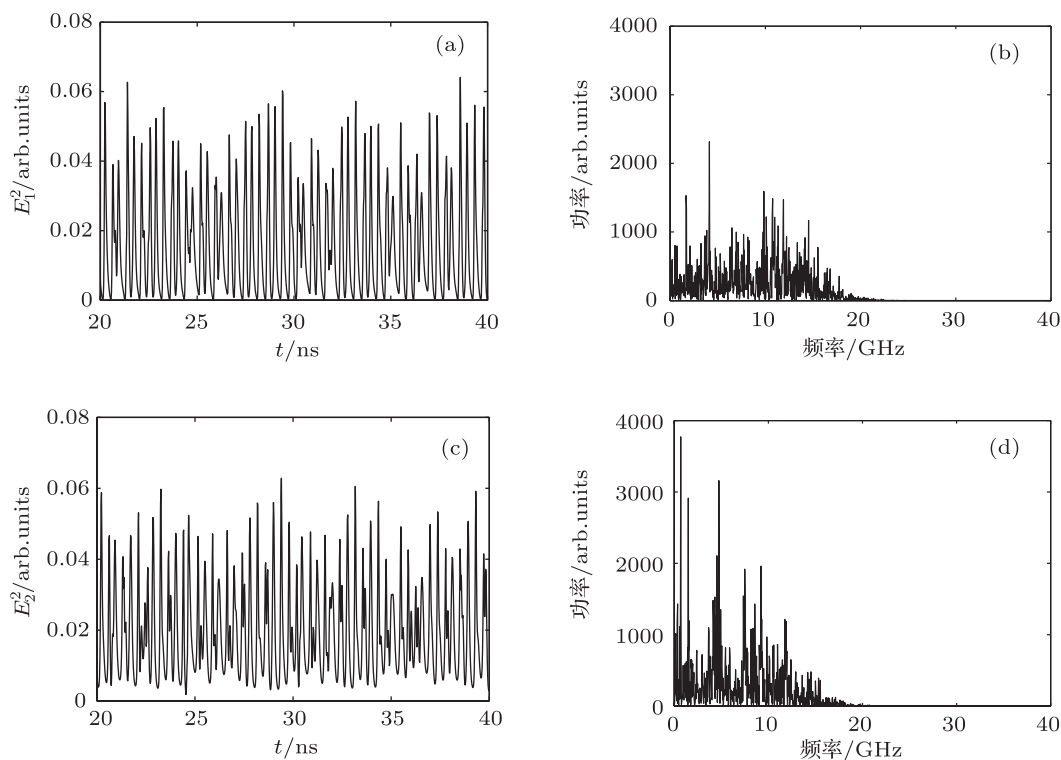


图 1 没有外部注入时两激光器的输出及功率谱 (a), (b) 激光器 1; (c), (d) 激光器 2

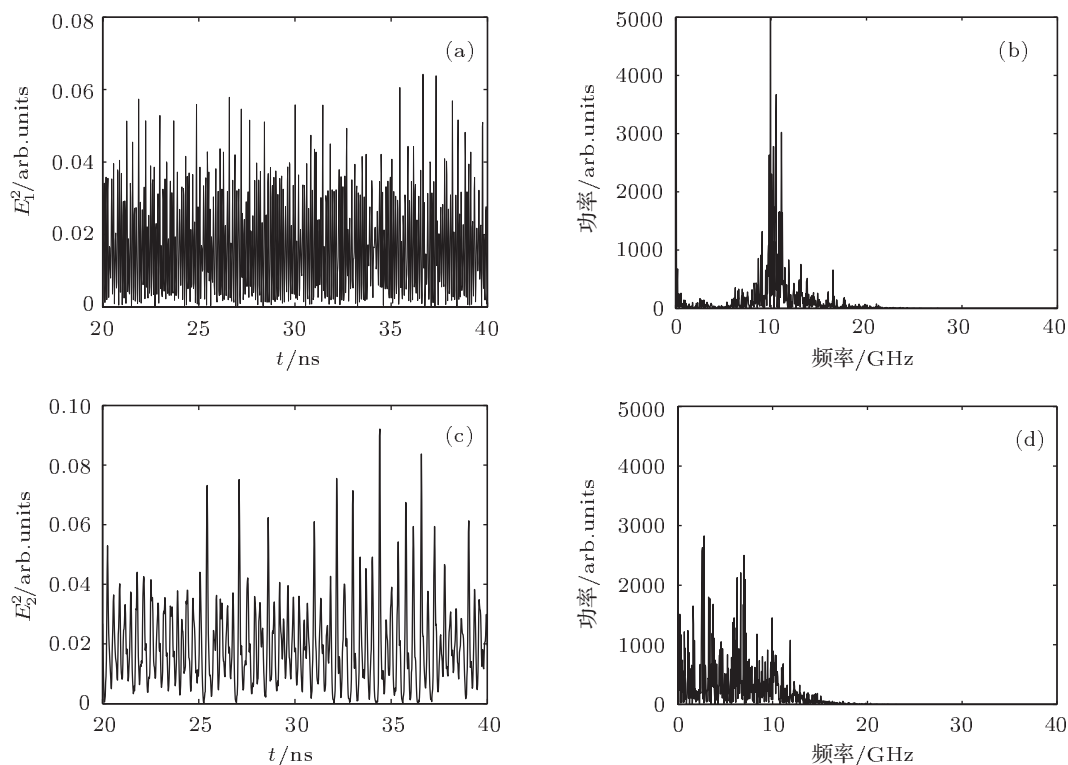


图2 有外部光注入时两激光器的输出及功率谱 (a), (b) 激光器 1; (c), (d) 激光器 2

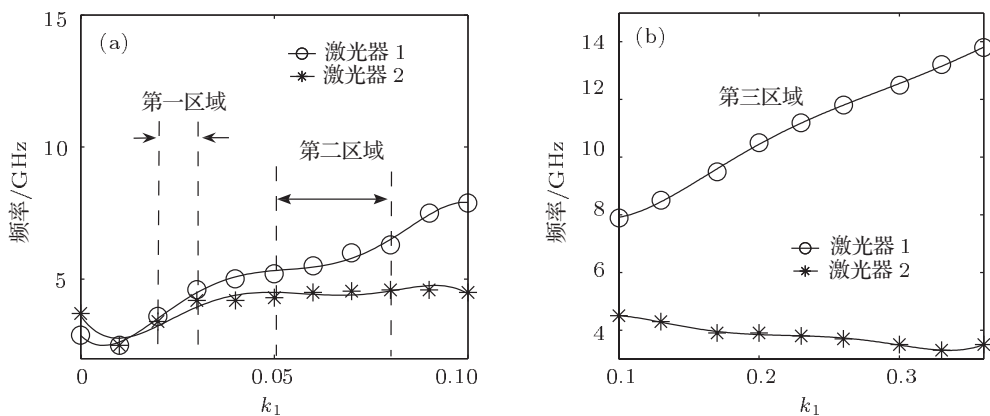


图3 两激光器振荡频率随注入水平的变化 (a) 第一、第二混沌扩频区域; (b) 整个第三混沌扩频区域

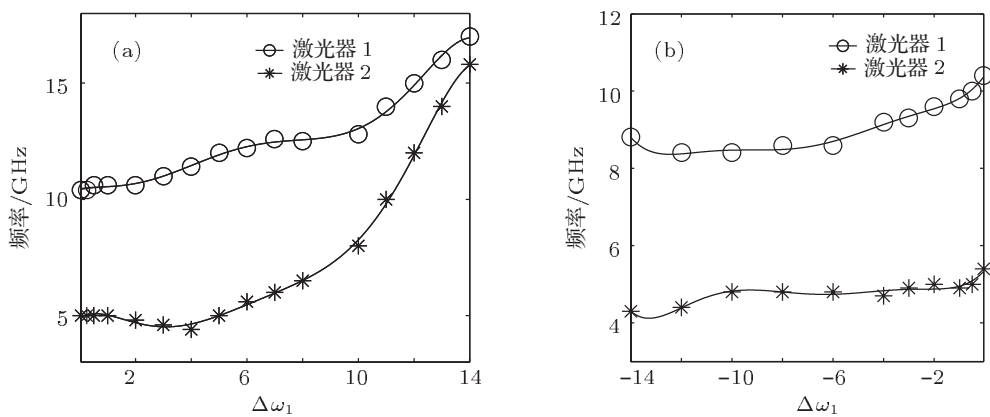


图4 两激光器混沌振荡频率随外部注入光频率失谐的变化 (a) 失谐正值区域; (b) 失谐负值区域

我们还关注注入光频率失谐对激光器混沌扩频效果的影响. 因为外部注入光会对激光器线宽增强因子和两激光器频率失谐产生一定的影响. 图 4 给出了两激光器混沌振荡频率变化随注入光频率失谐的影响, 其中参数 $k_1 = 0.2$, $|\Delta\omega_1|$ 从 0.05 GHz 增加到 14 GHz. 我们发现, 随着失谐正值的增加, 激光器 1 频率从 10.4 GHz 逐步增加到 17 GHz. 但激光器 2 频率变化先是缓慢减弱, 然后是快速增加. 在负失谐区域, 随失谐量加, 激光器 1 频率变化先是缓慢减弱, 最后有一点增加, 但总体上激光器 1 频率增强效果是明显的. 激光器 2 频率变化基本是缓慢减弱.

3.2 激光混沌控制

我们发现当注入光强度较弱时, 激光混沌可以被有效控制. 这种情况和通常注入锁模半导体激光器特性是相反的 [4-6]. 发现控制混沌的区域是 k_1 大约为 0.006—0.0085 (当 $\Delta\omega_1 = 1$ GHz 时). 当 $k_1 = 0.006$ 时, 图 5 显示两激光器可控制到不同的单周期态上, 但是两激光器频率锁定在 2.6 GHz 上. 当 $k_1 = 0.007$ 时, 控制结果也是相同的. 当 $k_1 = 0.008$ 时, 图 6 显示两激光器可控制到不同的双周期态. 当 $k_1 = 0.0083$ 时, 图 7 显示两激光器控制到两个不同的四周期态. 当 $k_1 = 0.0085$ 时, 图 8 显示两激光器控制到不同的六周期态上. 即在控制区域, 随着 k_1 值增加, 激光器会逐步向多周期态演化.

在这里, 我们还总结出激光器 1 混沌随光注入水平增加的发展 (单周期控制、多周期、混沌扩频等) 路径. 已发现当 k_1 值从 0.006 到 0.0085 时, 两激光器能控制到类周期态; 当 k_1 值继续增加到 0.01 时, 两激光器出现无衰减振荡, 其中振荡频率都是 2.5 GHz; 当 k_1 值从 0.02 增加到 0.03 时, 是第一混沌扩频区域; 当 $k_1 = 0.04$ 时, 是多周期区域;

当 k_1 值从 0.05 增加到 0.08 时, 是第二混沌扩频区域; 当 $k_1 = 0.09$ 时, 是另一个多周期区域; 当 k_1 值从 0.1 继续增加到 0.36 时, 是第三混沌扩频区域. 激光器 2 的混沌发展路径和激光器 1 基本相同.

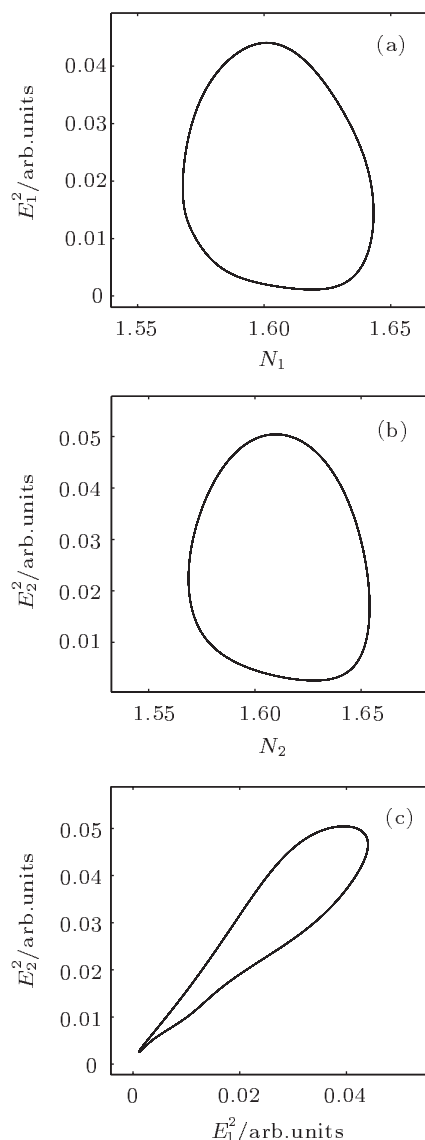


图 5 两激光器被控制到不同的单周期态上 (a) 激光器 1 的相轨迹; (b) 激光器 2 的相轨迹; (c) 激光器 1 和 2 构成的相轨迹

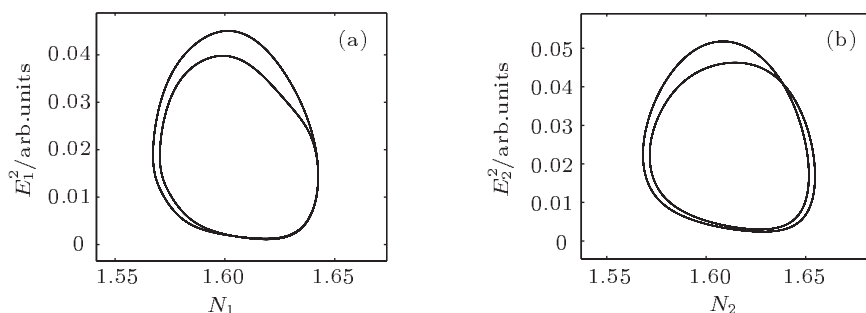


图 6 两激光器被控制到不同的双周期态上 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

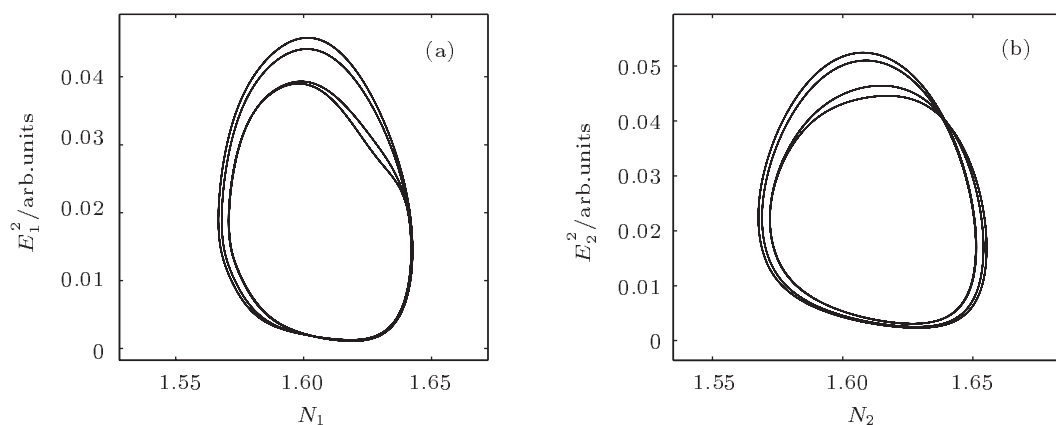


图7 两激光器被控制到不同的四周期态上 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

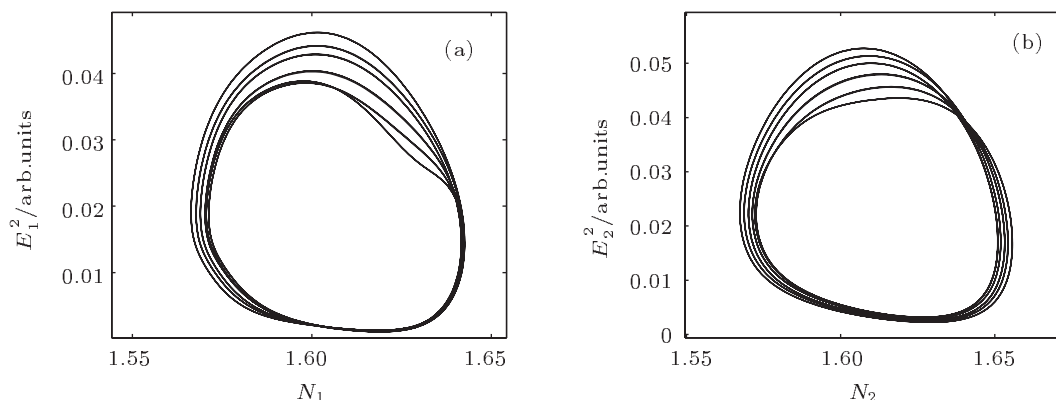


图8 两激光器被控制到不同的六周期态上 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

4 双激光器注入结果

4.1 激光混沌振荡频率增强特点

当外部光同时注入到两激光器时, 我们发现激光器系统混沌扩频一个区域是 k_1 在 0.05 到 0.12 之间, 如图 9 所示. 其中, 参数取 $k_1 = k_2 = 0.2$, $\Delta\omega_1 = 1.5 \text{ GHz}$, $\Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_0$. 可以发现随着 k_1 值增加, 激光器 1 频率会从 6.1 GHz 逐步增加到 9.5 GHz (3.5 倍), 激光器 2 频率会从 6.1 GHz 逐步增加到 9.8 GHz (2.65 倍). 即在强激光注入条件下, 随注入强度的增加, 两激光器混沌振荡会进一步增强.

我们分析注入光频率失谐对激光器混沌扩频效果的影响. 图 10 给出了两激光器混沌振荡频率随注入光频率失谐变化的情况, 其中参数取 $k_1 = k_2 = 0.1$, $\Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_0$, $\Delta\omega_1$ 从 0.05 GHz 增加到 3.5 GHz. 我们发现, 随着失谐正值的增加, 激光器 1 频率从 8.5 GHz 逐步增

加到 9.5 GHz. 但激光器 2 频率变化先是增加到 8.9 GHz 然后再缓慢减弱, 最后是从 8.6 GHz 逐步增加到 9.7 GHz. 在负失谐区域, 当 $\Delta\omega_1$ 从 -0.025 GHz 变化到 -2 GHz , 两激光器频率大约都在 8—8.7 GHz 范围变化, 在这个区域, 激光器混沌振荡频率都增加了.

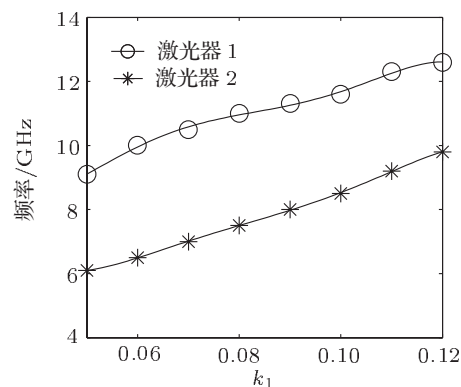


图9 两激光器混沌振荡频率随外部注入水平的变化, 其中激光器 1 整体向上平移了 3 GHz

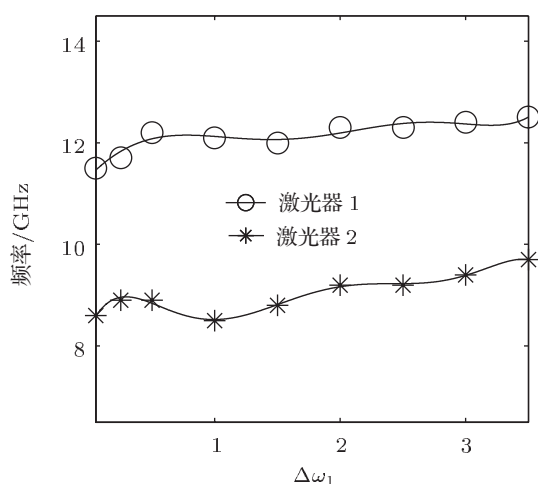


图 10 两激光器混沌振荡频率随外部注入光频率失谐的变化,其中激光器 1 整体向上平移了 3 GHz

4.2 激光混沌控制

我们发现当注入光强度较强时,激光混沌可以被有效控制.其中控制混沌的区域是 k_1 大约在 0.13—0.3 之间(当 $\Delta\omega_1 = 1$ GHz).当 $k_1 = 0.13$ 时,图 11 显示两激光器被控制到不同的六周期态

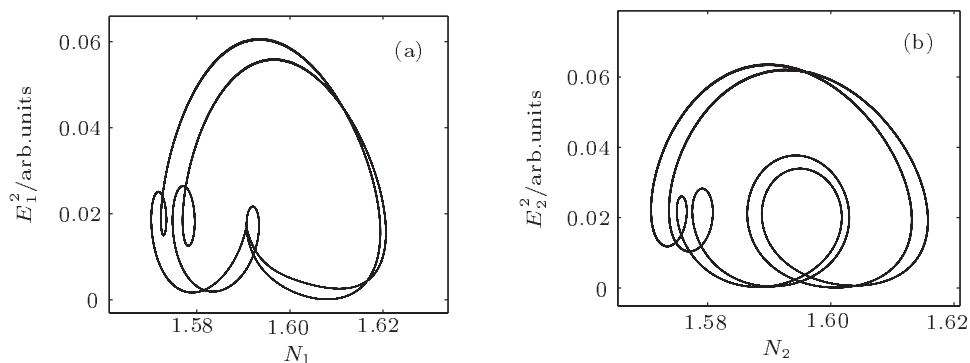


图 11 不同的六周期态 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

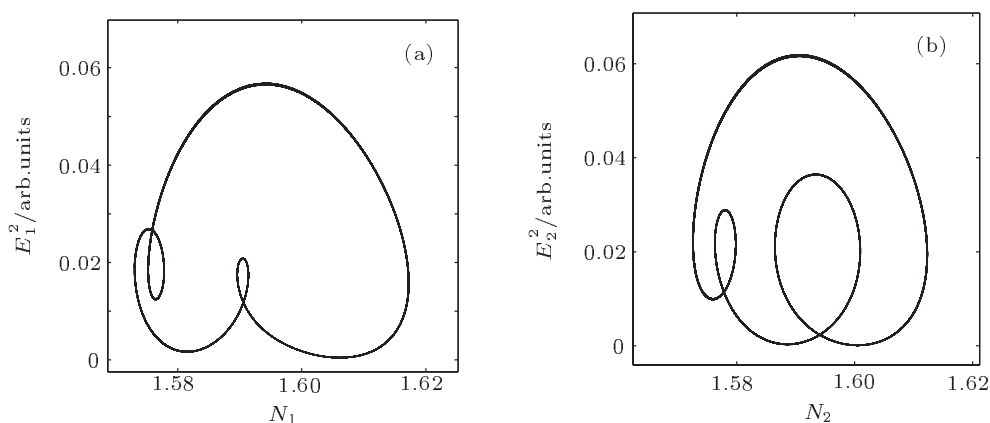


图 12 不同的三周期态 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

态上.当 $k_1 = 0.14$ 时,图 12 显示两激光器被控制到不同的三周期态上.还发现当 k_1 继续增加到 0.153 时,两激光器仍能被控制到不同的三周期态上.当 $k_1 = 0.16$ 时,图 13 显示两激光器被控制到不同的单周期态上,但两激光器频率都锁定在 10.5 GHz 上.当 $k_1 = 0.2$ 时,两激光器是不同的单周期态,但频率锁定在 11.5 GHz.当 $k_1 = 0.3$ 时,两激光器是不同的单周期态且锁定在 13 GHz 上.

在这里,我们总结出激光器混沌随注入光水平变化发展到单周期态的路径.发现 k_1 值从 0.005 增加到 0.03,两激光器仍是混沌态,其频率变化在 2.6—3.9 GHz 之间;当 $k_1 = 0.04$ 时,是多周期区域;当 k_1 值从 0.05 增加到 0.12 时,是混沌扩频区域;当继续增加 k_1 值从 0.13 到 0.3 时,两激光都处在类周期区域,其中当 $k_1 \geq 0.16$ 时,两激光器被控制到模式锁定的单周期态.我们发现单激光注入和双激光注入系统随注入水平增加其混沌发展道路是相反的.前者情况是激光器从单周期态逐步发展到频率增强的混沌态.后者情况则是激光从混沌态被制导到多周期态上,最后被控制到模式锁定的单周期态上.

我们还研究了注入光频率失谐对激光器控制情况, 其中参数取 $k_1 = k_2 = 0.1$, $\Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_0$. 当 $\Delta\omega_1 = -5$ GHz 时, 图 14 显示两激

光器控制到不同的双周期态上. 当 $\Delta\omega_1 = -7$ GHz 时, 图 15 显示两激光器可以控制到不同的四周期态上.

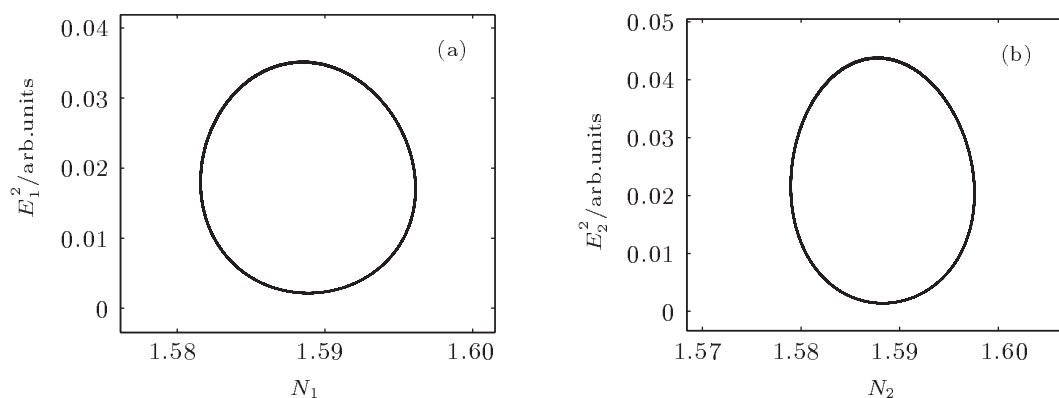


图 13 不同的单周期态 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

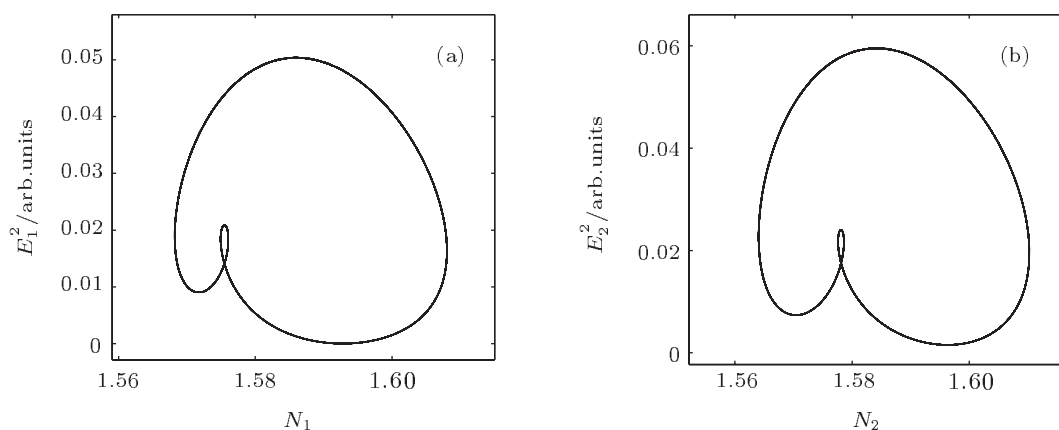


图 14 不同的双周期态 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

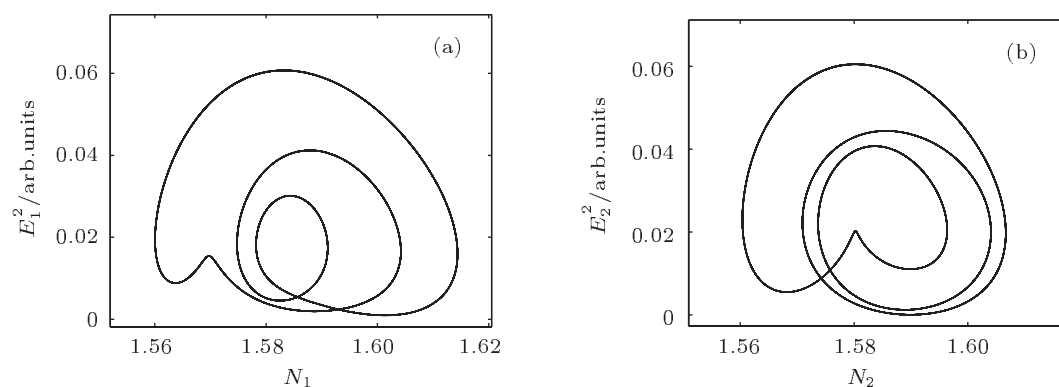


图 15 不同的四周期态 (a) 激光器 1; (b) 激光器 2

我们也总结出激光器系统混沌随注入光频率负失谐变化的演化控制到单周期态的一个路径. 发现 $\Delta\omega_1$ 值 (其中 $\Delta\omega_2 = \Delta\omega_1 - \Delta\omega_0$) 从 -0.05 — -4 GHz, 两激光器是混沌态, 其频率变化在 8 —

8.7 GHz 之间; 当 $\Delta\omega_1$ 从 -5 GHz 到 -8 GHz, 两激光器状态都处在类周期区域; 当 $\Delta\omega_1$ 从 -9 GHz 到 10 GHz, 又是一个混沌扩频区域, 其中两激光器频率可增加到 1 倍; 当 $\Delta\omega_1$ 变化到 -19 GHz, 两激

光是多周期;当 $\Delta\omega_1$ 变化到 -20 GHz 时,两激光出现了双周期.然后双周期逐步消失且向单周期态过渡.当 $\Delta\omega_1$ 从 -25 GHz 变化到 -30 GHz,两激光都出现相互模式锁定的单周期态,其中振荡频率都为 5.5 GHz.

5 结论

本文提出了外部光注入空间耦合半导体激光器系统.给出了稳定频率失谐公式;给出了随注入水平增加的单注入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;给出了双注入

注入水平增加使系统从混沌到类周期以及最后控制到单周期模式锁定的路径,以及给出了负频率失谐下混沌演化控制到单周期模式锁定的路径;发现了单注入时激光三个混沌扩频区域,指出强激光注入能非常有效地增强注入激光器的混沌振荡;给出了控制混沌到类周期的窗口等;另外,还发现了双注入时增强系统混沌振荡频率的窗口以及控制系统混沌的窗口等.本文对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的研究,对高维混沌系统以及特别是对高维激光混沌系统的增频和控制是非常有意义的,对耦合激光系统的研究与应用也具有一定的参考价值.

- [1] Roy R, Thornburg K S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2009
- [2] van Wiggeren G D, Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [3] Wu L, Zhu S Q 2003 *Phys. Lett. A* **308** 157
- [4] Ramos R V, Souza R F 2001 *Opt. Commun.* **22** 90
- [5] Zhang F, Chu P L 2003 *J. Lightwave Technol.* **21** 3334
- [6] Zhou Y, Wu L, Zhu S Q 2005 *Chin. Phys.* **14** 2196
- [7] 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]
- [8] Yan S L 2007 *Chin. Phys.* **16** 3271
- [9] Yang L, Pan W, Luo B, Zhang W L, Jiang N, Zhou Z, Yang G B 2008 *Chin. J. Lasers* **35** 992 (in Chinese) [杨磊, 潘炜, 罗斌, 张伟利, 江宁, 周志, 杨国标 2008 中国激光 **35** 992]
- [10] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Lodi V A, Colet P, Fischer I, Ojalvo J G, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [11] Wu J G, Wu Z M, Lin X D, Zhang Y, Zhong D Z, Xia G Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4169 (in Chinese) [吴加贵, 吴正茂, 林晓东, 张毅, 钟东洲, 夏光琼 2005 物理学报 **54** 4169]
- [12] Kusumoto K, Ohtsubo J 2002 *Opt. Lett.* **27** 989
- [13] Lodi V A, Benedetti M, Merlo S, Norgia M, Provinzano B 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1995
- [14] Paul J, Lee M W, Shore K A 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 920
- [15] Murakami A, Shore K A 2005 *Phys. Rev. A* **72** 053810
- [16] Takiguchi Y, Ohayagi K, Ohtsubo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 319
- [17] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, Wang B J, Li Y L, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才, 张耕玮, 王安帮, 王冰洁, 李艳丽, 郭萍 2007 物理学报 **56** 4372]
- [18] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M H, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [19] Liu X M, Yang X, Lu F, Ng J, Zhou X, Lu C 2005 *Opt. Express* **13** 142
- [20] Liu X M, Wang T, Shu C, Wang L R, Lin A, Lu K Q, Zhang T Y, Zhao W 2008 *Laser Phys.* **18** 1357
- [21] Ott E, Grebogi, York J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196
- [22] 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]
- [23] Yan S L 2006 *Chin. J. Lasers* (in Chinese) **33** 1043 [颜森林 2006 中国激光 **33** 1043]
- [24] 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]
- [25] Yan S L 2011 *Commun. Theor. Phys.* **55** 481
- [26] Deng T, Xia G Q, Wu Z M, Lin X D, Wu J G 2011 *Opt. Express* **19** 8762
- [27] Wu J G, Wu Z M, Tang X, Lin X D, Deng T, Xia G Q, Feng G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 759

Frequency enhancement and control of chaos in two spatial coupled semiconductor lasers using external light injection

Yan Sen-Lin[†]

(School of Physics and Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210017, China)

(Received 19 December 2011; revised manuscript received 29 January 2012)

Abstract

We present a novel system of oscillation frequency enhancement and control of chaos in two spatial coupled semiconductor lasers due to external light injection. We study the characteristics of frequency enhancement and control of chaos in the system and give a static frequency detuning formula. We find three regimes of chaotic enhancement when external light is injected into single laser, in which, strong light injection can result effectively in frequency enhancement in the injected laser, but the frequency weakens slowly in the other. And large detuning can result effectively in frequency enhancements in both lasers while the frequency can be enlarged 3.5 times more than the intrinsic frequency of the laser 1. Chaos-control region is found in low injection levels. In this region, lasers can be controlled to single-cycle, dual-cycle, cycle-4, cycle-6 and other quasi-cycles. When the dual-injection is present, strong light injection or large detuning can result effectively in frequency enhancements in both lasers while the frequency can be enlarged 3.5 or 2.65 times more than the intrinsic frequency of the laser 1 or 2. Chaos-control region is also found in large injection levels. In this region, both lasers can be controlled to single-cycle, cycle-3, cycle-6 and other quasi-cycles. We point out in detail a path from single-cycle to quasi-cycle to frequency enhancement of chaos when the single-injection is present. We find another reverse path from chaos to quasi-cycle to single-cycle when the dual-injection is present.

Keywords: chaos, control, frequency enhancement, spatial coupled semiconductor lasers

PACS: 05.45.Jn, 05.45.Pq, 42.55.Px

[†] E-mail: yansenlinbsh@sina.com