

基于频率失谐的光混沌同步 开关的特性研究*

邱 鑫 夏光琼 吴加贵 吴正茂†

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2007 年 6 月 15 日收到 2007 年 7 月 9 日收到修改稿)

针对实验报道的光混沌同步开关现象, 建立了基于半导体激光器的光混沌同步开关的理论模型. 利用该模型, 数值模拟了不同外腔反馈强度和注入强度下的光混沌同步开关特性. 结果表明, 固定外腔反馈强度, 不同注入强度下的混沌同步开关的对比度和宽度均不同, 当注入强度与外腔反馈强度相同时, 开关的对比度达到最大值. 进一步地, 当外腔反馈强度和注入强度同步增强时, 混沌同步开关的对比度和宽度均单调增大.

关键词: 光混沌同步开关, 半导体激光器, 频率失谐, 外腔反馈

PACC: 4265T, 4255P

1. 引 言

上世纪 90 年代初, Pecora 和 Carrol 提出应用混沌同步于保密通信中^[1,2]. 此后十几年间, 无论是在电学混沌^[3,4]还是在光学混沌^[5-7]领域, 基于混沌同步的保密通信受到了人们的广泛关注. 而由于光混沌同步的动力学行为复杂, 对参数高度敏感, 便于调制等特性, 因而已成为当前混沌保密通信的一个研究热点^[5-20]. 在基于半导体激光器(LD)的主从构架或互耦构架中, 包括超前同步(又称完全同步, CCS)双向同步, 锁相同步, 注入锁定同步(又称广义同步, GCS)等多种混沌同步的状态均得到报道^[13-18].

2005 年, Lee 等人从实验上观察到由激光器频率失谐导致的光混沌同步开关现象, 即改变光混沌同步系统的发射和接收激光器的频率失谐量, 系统将在 CCS 态和 GCS 态之间转换, 从而呈现一种混沌同步开关现象^[19]. 基于这种现象, 将有可能开发出新型的混沌数字隐藏技术. 本文主要从理论上较为详细地研究了不同外腔反馈强度和注入强度下的该系统的光混沌同步开关特性, 希望能为进一步研究光混沌同步开关现象提供相关的理论基础和技术指导.

2. 理论模型

基于 LD 的光反馈开环混沌同步系统的模型如图 1 所示.

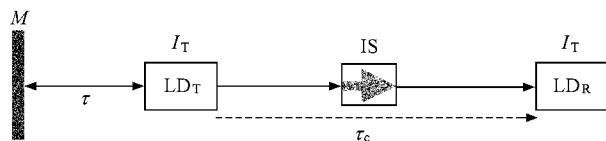


图 1 基于 LD 的光反馈开环混沌同步系统模型(LD_T 为发射激光器; LD_R 为接收激光器; IS 为光隔离器; M 为外腔镜)

发射激光器 LD_T 的部分输出经外腔镜 M 反馈后重新回到激光器中. 在适当参数条件下, LD_T 会进入混沌态, 得到光混沌输出. LD_T 的输出经光隔离器 IS 后, 注入接收激光器 LD_R 中, 调节 LD_T 和 LD_R 的工作参量, 可使系统实现混沌同步. 该系统可用以下速率方程来描述^[11]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_T(t)}{dt} &= \frac{1}{2}(G_N - \gamma_p)E_T(t) \\ &\quad + k_1 E_T(t - \tau) \cos(\theta_T(t)), \\ \frac{d\Phi_T(t)}{dt} &= \frac{\alpha}{2}(G_N - \gamma_p) \end{aligned}$$

* 重庆市自然科学基金和西南大学高新技术培育基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zmwu@swu.edu.cn

$$\begin{aligned}
 & -k_l \frac{E_T(t-\tau)}{E_T(t)} \sin(\theta_T(t)), \\
 \frac{dN_T(t)}{dt} &= J - \gamma_s N_T(t) - G_N |E_T(t)|^2, \\
 \theta_T(t) &= \omega_T \tau + \Phi_T(t) - \Phi_T(t-\tau); \quad (1) \\
 \frac{dE_R(t)}{dt} &= \frac{1}{2}(G_N - \gamma_p) E_R(t) \\
 &+ k_c E_T(t-\tau_c) \cos(\theta_R(t)), \\
 \frac{d\Phi_R(t)}{dt} &= \frac{\alpha}{2}(G_N - \gamma_p) \\
 &- k_c \frac{E_T(t-\tau_c)}{E_R(t)} \sin(\theta_R(t)), \\
 \frac{dN_R(t)}{dt} &= J - \gamma_s N_R(t) - G_N |E_R(t)|^2, \\
 \theta_R(t) &= -\Delta\omega t + \omega_T \tau_c + \Phi_R(t) - \Phi_T(t-\tau_c). \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中 T, R 分别代表发射、接收激光器, E 和 Φ 是激光器的慢变场振幅和慢变相位, N 是载流子数, θ 是相位差, J 表征注入载流子速率, G_N 为增益常数, $G_N = g(N - N_0) / (1 + E^2/E_s^2)$, g 为微分增益系数, N_0 为透明载流子数, E_s 为饱和光场, α 为线宽增强因子, γ_p 为光子损耗系数, γ_s 为载流子的损耗系数, τ 为反馈延迟时间, τ_c 为传输时间, k_l 为外腔反馈强度, k_c 为注入强度, $\omega_T = \frac{2\pi c}{\lambda_T}$ 为发射激光器的角

频率 (λ_T 为发射激光器的波长, c 为光速), $\Delta\omega = 2\pi \times \Delta f$, $\Delta\omega$ 为发射激光器减去接收激光器的角频率差, Δf 为相应的频率差. 一般来说, 通过改变 LD_T 和 LD_R 的温度或者电流可以改变 Δf 值.

3. 混沌开关

采用四阶龙格-库塔法对速率方程 (1) (2) 进行数值求解, 计算中所用的各参量为 $g = 3.2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $\alpha = 3.0$, $N_0 = 1.25 \times 10^8$, $E_s = 2.0352 \times 10^3$, $\gamma_p = 2.38 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$, $\gamma_s = 6.21 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, $\tau = 2 \text{ ns}$, $\tau_c = 2 \text{ ns}$, $\lambda_T = 1550 \text{ nm}$, $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$, $J = 3.045 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$.

若设定 $k_l = k_c = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, LD_T 和 LD_R 将实现混沌同步. 图 2(a) 给出了处于混沌同步的 LD_T 和 LD_R 输出时间序列图. 从图中可以看出 LD_T 和 LD_R 的时间序列严格相同, 这表明了 LD_T 和 LD_R 处于完全同步状态. 另外, 通过考察两个激光器输出的延迟时间 $\Delta\tau$ 可以区分系统的 CCS 态和 GCS 态^[20]. CCS 的延迟时间 $\Delta\tau_{\text{CCS}}$ 与反馈延迟时间 τ 和传输时间 τ_c 相关; 而 GCS 的延迟时间 $\Delta\tau_{\text{GCS}}$ 与传输时间 τ_c 相关^[20]. 在数学上可表示为

$$\begin{aligned}
 \Delta\tau_{\text{CCS}} &= \tau_c - \tau, \\
 \Delta\tau_{\text{GCS}} &= \tau_c. \quad (3)
 \end{aligned}$$

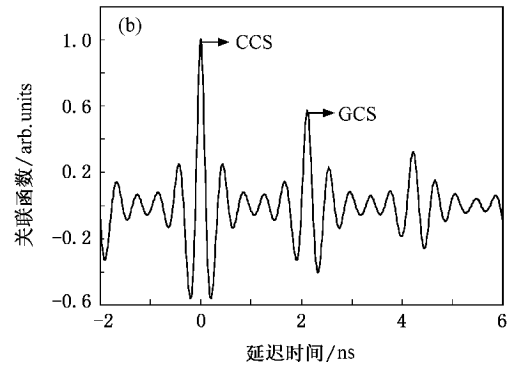
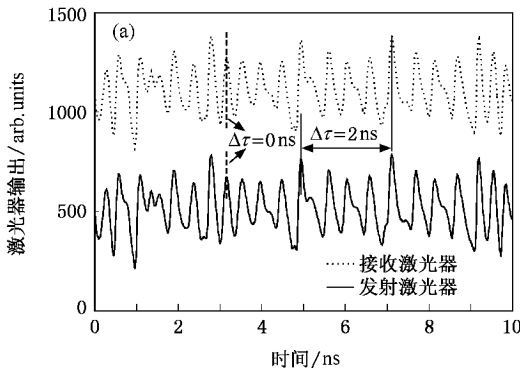


图 2 $\Delta f = 0 \text{ GHz}$, $k_l = k_c = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 时 (a) 同步时间序列图; (b) 相关函数图

在本文中, 设 $\tau = \tau_c = 2 \text{ ns}$, 则相应 $\Delta\tau_{\text{CCS}} = 0 \text{ ns}$, $\Delta\tau_{\text{GCS}} = 2 \text{ ns}$. 为了更准确地描述系统的同步状态及其与延迟时间的关系, 引入关联函数 $\alpha(\Delta t)$ ^[19],

$$\begin{aligned}
 \alpha(\Delta t) &= \frac{(P_T(t) - P_T) \times (P_R(t + \Delta t) - P_R)}{\sqrt{(P_T(t) - P_T)^2 (P_R(t + \Delta t) - P_R)^2}}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

图 2(b) 给出了系统完全同步时的关联函数图. 从图中可以看出, $\Delta t = 0 \text{ ns}$ 的关联函数峰值对应 CCS 态, $\Delta t = 2 \text{ ns}$ 的关联函数峰值对应 GCS 态. 结合图 2(a) 和图 2(b) 可以得到, CCS 态和 GCS 态同时存在于系统中. 在一定条件下, CCS 态的关联函数值更大, CCS 态占主导, 则系统总的呈现为 CCS 态. 如果改变系统工作参量, 如引入频率失谐^[19], 使 GCS 态

占据主导,则系统总的呈现为 GCS 态.这种系统在 CCS 态和 GCS 态之间的转换,就构成了混沌同步开关.

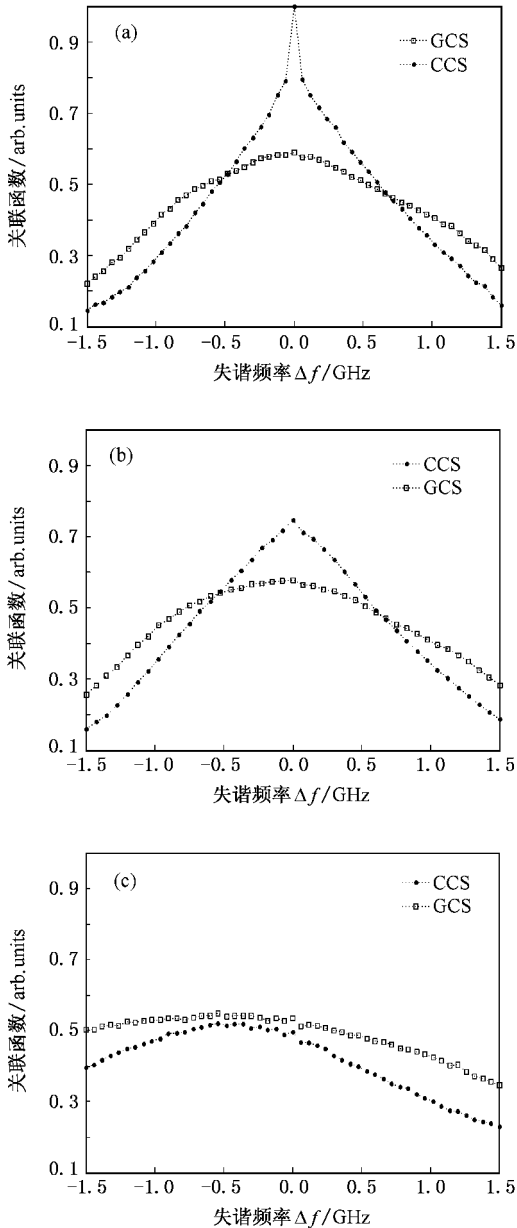


图3 不同注入强度 k_c 的同步开关图 (a) $k_t = k_c = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$; (b) $k_t = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $k_c = 5.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$; (c) $k_t = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $k_c = 7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$

图3给出了不同注入强度 k_c 下的同步开关图.从图3(a)可看出:当 Δf 在 -1.5 GHz 到 -0.49 GHz , 0.67 GHz 到 1.5 GHz 时, $C_{\text{GCS}} > C_{\text{CCS}}$, 系统处于 GCS 态;当 $-0.49 < \Delta f < 0.67 \text{ GHz}$ 时, $C_{\text{CCS}} > C_{\text{GCS}}$, 系统处于 CCS 态;当 $\Delta f = -0.49 \text{ GHz}$ 和 $\Delta f = 0.67 \text{ GHz}$ 时, $C_{\text{CCS}} = C_{\text{GCS}}$, 系统处于 CCS 态与 GCS 态的转换

点.可见,混沌开关总是对应着两个转换点,一个位于正频差区域,另一个位于负频差区域.当 $k_t = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $k_c = 5.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 时(如图3(b)所示), CCS 区域的同步性显著减弱.进一步增大注入强度,如图3(c)所示,在 Δf 在 -1.5 GHz 到 1.5 GHz 范围内,系统全部处于 GCS 态,混沌开关消失.可见,不同注入强度下,系统的混沌开关特性显著不同.以上结果与文献[19]的实验报道结果定性相符.

4. 混沌开关特性分析

为进一步地考查开关特性,定义混沌开关对比度为系统 CCS 态和 GCS 态的关联函数最大值的差值,可表示为 $\Delta C = C_{\text{CCS max}} - C_{\text{GCS max}}$. 定义混沌开关宽度为 CCS 态和 GCS 态的两个转换点对应的频率失谐差的绝对值,可表示为 $\Delta(\Delta f) = |\Delta f_1 - \Delta f_2|$, Δf_1 , Δf_2 分别表示开关两个转换点对应的频率失谐量.混沌开关对比度可以描述开关现象的明显程度,而混沌开关宽度可以描述混沌开关所对应的频率失谐区域的大小.

图4(a)给出了 $k_t = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 时,注入强度 k_c 从 $3.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 增大到 $5.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌开关图.图4(b)为混沌开关对比度 ΔC 随注入强度改变的变化曲线.可以看出,随着注入强度的增大, ΔC 先增大,后减小;当 $k_c = k_t = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 时, ΔC 取得最大值,这时混沌开关现象最明显.图4(c)给出了混沌开关宽度 $\Delta(\Delta f)$ 随注入强度变化的曲线.从图中可以看出,随着注入强度的增大, $\Delta(\Delta f)$ 先增大,在 $k_c = 5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 附近时, $\Delta(\Delta f)$ 取得最大值,随着 k_c 进一步增大, $\Delta(\Delta f)$ 值急剧减小.

图5(a)给出了 k_t 和 k_c 同时从 $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 增大到 $6.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌开关图.图5(b)为混沌开关对比度 ΔC 随 k_t 和 k_c 变化的曲线.可以看出,随着 k_t 和 k_c 从 $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 增大到 $7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, ΔC 始终单调递增,即当反馈强度和注入强度都增大时,混沌开关现象将变得更加明显.图5(c)给出了混沌开关宽度 $\Delta(\Delta f)$ 随注入强度改变的变化曲线.从中可以看出,随着反馈强度和注入强度从 $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 增大到 $7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $\Delta(\Delta f)$ 也呈单调递增趋势,开关所对应的频率失谐区域逐渐增大.进一步考查 k_t 和 k_c 大于 $7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的情况,会发现 ΔC , $\Delta(\Delta f)$ 最终趋于不变.总之,当 k_t 和 k_c 同时增加时,随着

反馈强度和注入强度的增大,混沌开关现象将变得更加明显,开关对应的频率失谐区域逐渐变大最后趋于不变.

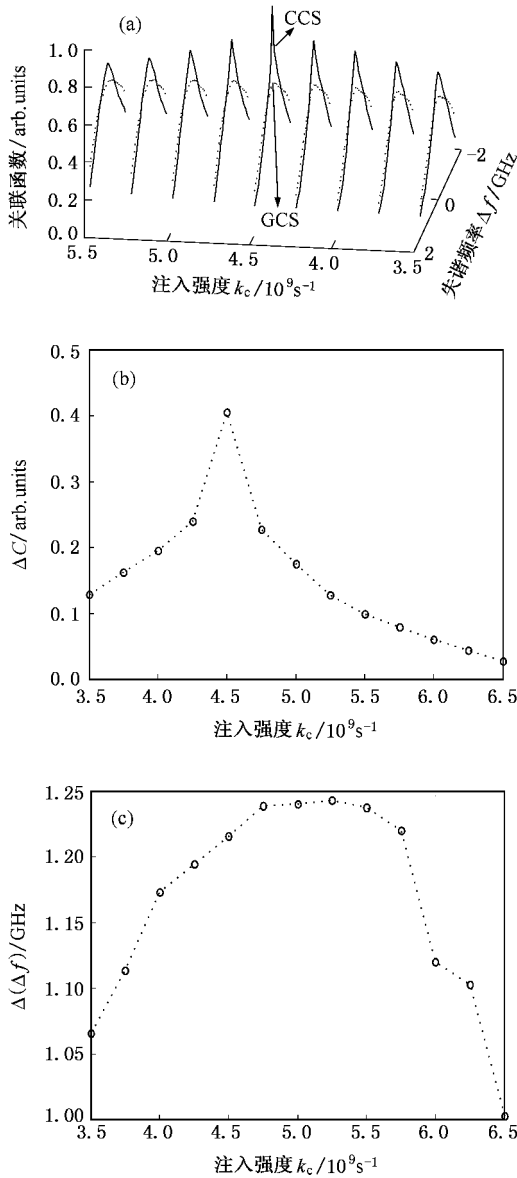


图4 (a) $k_t = 4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, k_c 从 $3.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 到 $5.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌同步开关图;(b) k_c 从 $3.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 到 $6.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌开关对比度;(c) k_c 从 $3.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 到 $6.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌开关宽度

5. 结 论

本文针对实验报道的光混沌同步开关现象,从理论上分析了不同外腔反馈强度及不同注入强度下光混沌同步开关特性.结果表明,随着的外腔反馈强度和注入强度的改变,光混沌同步开关特性发生显

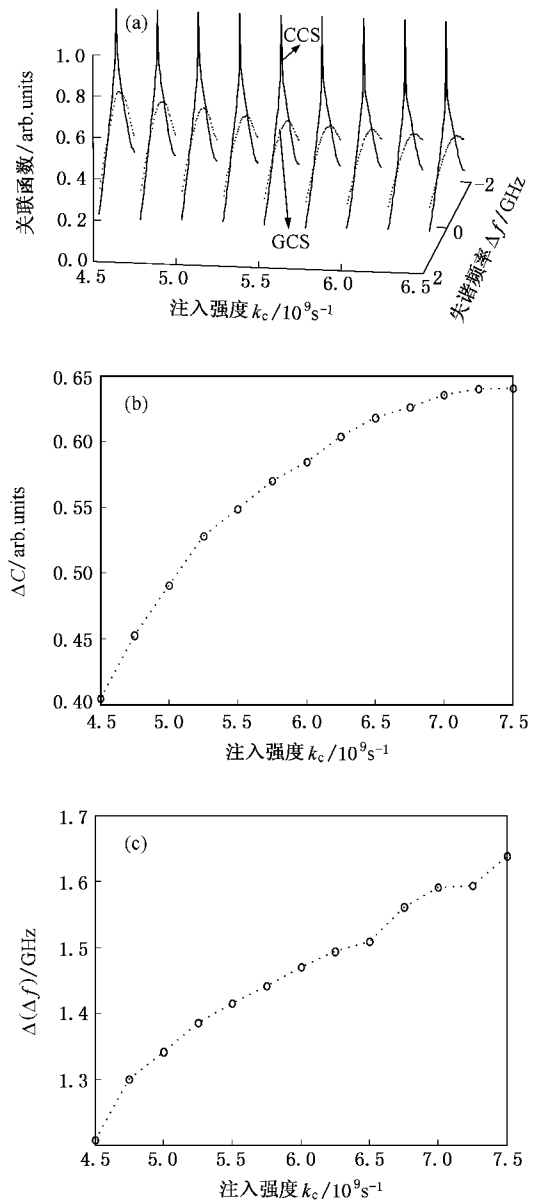


图5 (a) k_t 和 k_c 从 $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 到 $6.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌同步开关图;(b) k_t 和 k_c 从 $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 到 $7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌开关对比度;(c) k_t 和 k_c 从 $4.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 到 $7.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 的混沌开关宽度

著变化.通过定义混沌同步开关的对比度和宽度来表征混沌同步开关的明显程度和存在区域.当外腔反馈强度不变时,注入强度与外腔反馈强度相等时开关的对比度达到最大值,混沌开关最明显;当外腔反馈强度与注入强度相等时,外腔反馈强度与注入强度越大,混沌同步开关越明显.本文的研究将有助于更深入地认识光混沌同步开关机理,并为开发新型的混沌数字隐藏技术提供相关理论基础.

- [1] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Pecora L M , Carroll T L 1991 *Phys. Rev. A* **44** 2374
- [3] Cuomo K M , Oppenheim A V 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 65
- [4] Cuomo K M , Oppenheim A V , Strogatz S H 1993 *IEEE Trans. Circuits Syst. II* **40** 626
- [5] VanWiggeren G D , Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [6] Argyris A , Syvridis D , Larger L , Annovazzi-Lodi V , Colet P , Fischer I , Garcia-Ojalvo J , Mirasso C R , Pesquera L , Shore K A 2005 *Nature* **437** 343
- [7] Liu J M , Chen H F , Tang S 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1184
- [8] Yan S L , Wang S Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1687 (in Chinese)
[颜森林、汪胜前 2006 物理学报 **55** 1687]
- [9] 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]
- [10] Fan W H , Tian X J , Yu Y L , Chen J F , Luo H E 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5105 (in Chinese) [范文华、田小建、于永力、陈菊芳、罗红娥 2006 物理学报 **55** 5105]
- [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] Liao J F , Xia G Q , Wu J G , Xu L , Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6301 (in Chinese) [廖健飞、夏光琼、吴加贵、许黎、吴正茂 2007 物理学报 **56** 6301]
- [13] Sivaprakasam S , Shore K A 1999 *Opt. Lett.* **24** 1200
- [14] Hong Y , Lee M W , Spencer P S , Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 1215
- [15] Heil T , Fischer I , Elsässer W , Mulet J , Mirasso C R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 795
- [16] Masoller C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2782
- [17] Uchida A , Kinugawa S , Matsuura T , Yoshimori S 2003 *Phys. Rev. E* **67** 026220-1
- [18] Murakami A 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 438
- [19] Lee M W , Paul J , Pierce I , Shore K A 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 302
- [20] Liu Y , Davis P , Takiguchi Y , Aida T , Saito S , Liu J M 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 269

Investigation on frequency-detuning induced optical chaos synchronization switching^{*}

Qiu Xin Xia Guang-Qiong Wu Jia-Gui Wu Zheng-Mao[†]

(School of Physics , Southwest University , Chongqing 400715 , China)

(Received 15 June 2007 ; revised manuscript received 9 July 2007)

Abstract

A theoretical model characterizing a reported experiment on optical chaos synchronization switching is presented. Based on the model, the characteristics of optical chaos synchronization switching have been numerically simulated for different feedback strength and injection strength. The results show that: for a fixed feedback strength, both on-off switching ratio and width of the chaos switching will vary with the change of injection strength. When the injection strength equals to the feedback strength, the on-off switching ratio will reach a maximum. Furthermore, when the feedback strength and the injection strength are increased synchronously, both the on-off switching ratio and the width of the chaos switching will increase monotonically.

Keywords : optical chaos synchronization switching , semiconductor laser , frequency detuning , external cavity feedback

PACC : 4265T , 4255P

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Chongqing City , China , and the High-Tech Nurtured Fund of the Southwest University.

[†] Corresponding author. E-mail : zmwu@swu.edu.cn