

# 开环单向光混沌系统中广义与完全同步转换

李能尧<sup>1</sup> 吴加贵<sup>1</sup> 吴正茂<sup>1</sup> 丁 灵<sup>1</sup> 沈金亭<sup>1</sup> 夏光琼<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715  
<sup>2</sup> 电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 610054)

**摘要** 在由一个外腔分布反馈(DFB)半导体激光器和一个独立的 DFB 半导体激光器构成的开环单向耦合混沌同步系统中,通过微调发射激光器的偏置电流可以精确控制两个激光器之间的频率失谐,从而可对不同频率失谐下的系统混沌同步状态进行研究。实验研究结果表明,在较小的频率失谐范围( $-0.19\sim 0.95$  GHz)之内,混沌时间序列在传输延迟时间与外腔反馈时间之差处得到了最大 0.84 的关联值,而在传输延迟时间处的关联值为 0.78。此时,完全同步超越广义同步,系统呈现完全同步状态(CCS);当频率失谐超过这一范围,广义同步超越完全同步,混沌同步将表现为广义同步状态(GCS)。因此,通过调节发射激光器的电流,可实现完全同步和广义同步之间的转换。理论仿真结果与实验所得结果趋势相同。

**关键词** 激光技术; 分布反馈半导体激光器; 混沌同步; 广义同步; 完全同步; 频率失谐

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214008

## Switching between Complete Synchronization and Generalized Synchronization in an Open-Loop Unidirectional Optical Chaos Synchronization System

Li Nengyao<sup>1</sup> Wu Jiagui<sup>1</sup> Wu Zhengmao<sup>1</sup> Ding Ling<sup>1</sup> Shen Jinting<sup>1</sup> Xia Guangqiong<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** In an open-loop unidirectionally coupled chaotic system composed of an external cavity distributed feedback (DFB) semiconductor laser and an isolated DFB semiconductor laser, frequency detuning between two lasers can be controlled accurately by adjusting the bias current of transmitting laser carefully, and then the chaos synchronization state under different frequency detuning values can be investigated. The experimental results show that the system behaves with complete chaos synchronization (CCS) for frequency detuning within a small range ( $-0.19\sim 0.95$  GHz), where the highest correlation value of CCS is 0.84 and the highest correlation value of generalized chaos synchronization (GCS) is 0.78; once the frequency detuning is beyond this range, chaos synchronization will be switched from CCS to GCS. Therefore, synchronization switching between complete synchronization and generalized synchronization can be achieved by adjusting the bias current of transmitting laser. The theoretical simulations exhibit the similar variation tendency as that of the experimental results.

**Key words** laser technique; distributed feedback semiconductor laser; chaos synchronization; generalized synchronization; complete synchronization; frequency detuning

**OCIS codes** 140.5960; 140.1540; 190.5970

收稿日期: 2010-06-04; 收到修改稿日期: 2010-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(60978003, 161078003)、中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2009B010)和光纤传感与通信教育部重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 李能尧(1985—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光非线性动力学方面的研究。E-mail: linengyao@126.com

导师简介: 夏光琼(1970—),女,博士,教授,主要从事非线性光学和光混沌通信等方面的研究。

E-mail: gqxia@swu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

由于混沌运动具有对初始条件极度敏感的特点,因此实现混沌同步长久以来被认为是不可能的。直到 1990 年,美国海军实验室 Pecora 等<sup>[1]</sup>证明并实现了混沌同步<sup>[2]</sup>,随后不同结构的基于电或激光的混沌同步系统相继被提出。其中激光混沌及混沌同步因其在保密通信、扩频技术和脉冲整形等领域有极大的应用前景而受到特别关注<sup>[3~29]</sup>。激光混沌同步系统主要有单向耦合和双向耦合两种,两种耦合方式都存在开环和闭环两种结构。

2000 年,基于驱动-响应混沌同步方法,美国加州大学洛杉矶分校的 Chen 等<sup>[3]</sup>提出了基于半导体激光器的开环混沌同步方案,分析了激光相位、参数失配等因素对同步的影响。随后,很多学者对半导体激光器的开环混沌同步进行了深入研究<sup>[4~8]</sup>。研究结果表明单向耦合混沌同步系统可能存在两种不同类型的混沌同步,即完全同步(CCS)和广义同步(GCS)。系统呈现的混沌同步类型与反馈延迟时间、注入强度和反馈强度、内参数失配以及频率失谐等参数密切相关<sup>[9~14]</sup>。

在文中,固定接收分布反馈(DFB)激光器(DFB-RL)偏置电流,通过小范围改变发射激光器(DFB-TL)偏置电流来改变两激光器的频率失谐,在不同的频率失谐条件下实验上观测到了 CCS 和 GCS,并通过连续调节发射激光器的偏置电流实现

了两种不同同步类型的转换。理论仿真结果与实验结果具有相似的变化趋势。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,混沌发射系统由一个 DFB-TL 和一个外腔反馈镜构成。DFB-TL 为边模抑制比(SMSR)大于 50 dB 的 DFB 半导体激光器,DFB-TL 在超低噪声电流源(ILX-Lightwave, LDX-3620)和高精度温控源(ILX-Lightwave, LDT-5412)的控制下,其输出经过准直透镜 AL1 后,由分束镜 BS1 和 BS2 进行分束,其中一部分通过反射镜 M 和中性密度滤波片 NDF1 后反馈回 DFB-TL,一部分进入检测系统,剩余部分通过光隔离器(OI2)和 NDF2 注入到 DFB-RL 中。同时,DFB-RL 的输出也被送入到检测系统。检测系统由光谱分析仪 OSA(Ando AQ6317C)和数字示波器 OSC(Agilent 54855A,采样速度 20 GSa/s,带宽为 6 GHz)构成。带宽为 12 GHz 的光电探测器(PD, New Focus, 1544-B)用于把光信号转化为电信号。中性滤波器 NDF1 和 NDF2 分别用来调节反馈率和注入率,光隔离器 OI 是为了保证光的单向传输。在整个实验过程中,DFB-TL 的外腔反馈时间和 DFB-TL 到 DFB-RL 的传输延迟时间都保持在 3.45 ns,而 DFB-RL 的电流和温度分别为 20.15 mA 和 19 °C。

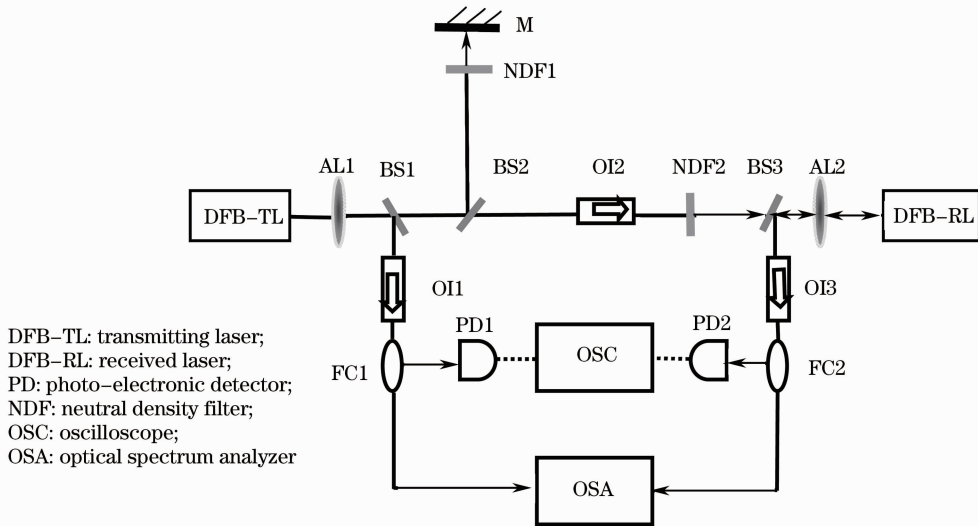


图 1 开环单向混沌同步方案实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of open-loop unidirectional chaos synchronization experimental setup

## 3 实验结果和讨论

当 DFB-TL 的偏置电流  $I_t = 20.08$  mA(约 1.8 倍

阈值),温度稳定在 21.63 °C,而 DFB-RL 的电流和温度分别控制在 20.15 mA 和 19 °C,DFB-TL 和 DFB-

RL 自由运行时的光谱分别如图 2(a),(b)所示。此时 DFB-TL 和 DFB-RL 具有相同的中心波长 1549.81 nm。通过调节 NDF1 和 NDF2 来改变反馈率和注入率,可使两激光器均处于混沌状态,此时 DFB-TL 和 DFB-RL 的光谱分别如图 2(c),(d)所示。

图 3 为 DFB-TL 的电流  $I_t$  分别为 19.46 mA (图 a1,a2)和 18.66 mA(图 b1,b2)时 DFB-TL(图 a1, b1)以及 DFB-RL(图 a2,b2)的时间序列图。当  $I_t =$

19.46 mA,此时相应的频率失谐为 0.60 GHz;而当  $I_t = 18.66$  mA,此时相应的频率失谐为 1.53 GHz。从图中可以看出,当 DFB-TL 的电流为 19.46 mA 时,DFB-TL 和 DFB-RL 之间表现为零时延同步;而当 DFB-TL 的电流为 18.66 mA,DFB-RL 的混沌输出滞后于 DFB-TL 的混沌输出,滞后时间为两激光器之间的传输延迟时间。

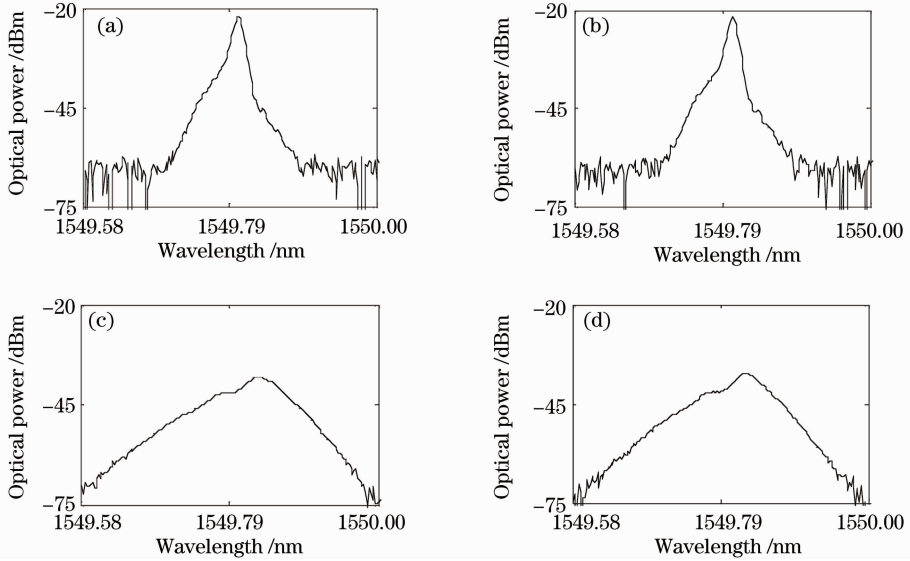


图 2 DFB-TL(a)和 DFB-RL(b)自由运行时的光谱,DFB-TL 在外反馈下的光谱(c)和 DFB-RL 在 DFB-TL 光注入下的光谱(d)

Fig. 2 Free-running optical spectrum for (a) DFB-TL and (b) DFB-RL, optical spectrum for (c) DFB-TL with external optical feedback and (d) DFB-RL spectrum subject to DFB-TL injection

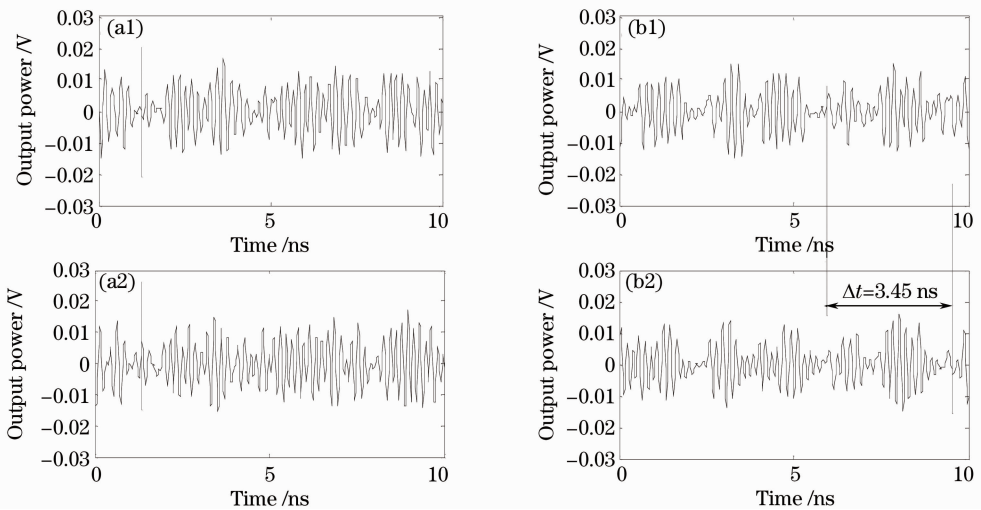


图 3 DFB-TL 与 DFB-RL 的输出时间序列

Fig. 3 Output time series for DFB-TL and DFB-RL

混沌同步可以分为 GCS 和 CCS,两者之间明显的差别在于两个激光器输出的混沌同步移动时间  $\Delta\tau^{[12]}$  不同,两种同步的移动时间分别为

$$\Delta\tau_{CCS} = \tau_c - \tau, \quad (1)$$

$$\Delta\tau_{GCS} = \tau_c, \quad (2)$$

式中  $\tau$  和  $\tau_c$  分别为 DFB-TL 外腔反馈时间和从

DFB-TL 到 DFB-RL 的传输延迟时间。

混沌同步的移动时间可以通过关联函数  $C(\Delta t)$  的最大值所对应的时间移动来确定, 关联函数定义为

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [P_1(t) - \langle P_1 \rangle][P_2(t + \Delta t) - \langle P_2 \rangle] \rangle}{\{ \langle [P_1(t) - \langle P_1 \rangle]^2 \rangle \langle [P_2(t) - \langle P_2 \rangle]^2 \rangle \}^{1/2}}, \quad (3)$$

式中下标 1, 2 分别代表 DFB-TL 和 DFB-RL,  $\langle \rangle$  表示对时间的平均,  $P$  为激光器输出功率,  $\Delta t$  为时间移动,  $C = 1$  时, 系统完全同步。为了便于叙述, 在文中定义  $C_{CCS} = C(\tau_c - \tau)$  为完全同步的关联系数,  $C_{GCS} = C(\tau_c)$  为广义同步的关联系数。

图 4 为  $I_t$  分别为 19.46 mA 和 18.66 mA 时相应的关联函数图。在图 4(a) 中,  $I_t = 19.46$  mA 所对应的  $\Delta f = 0.60$  GHz 时,  $C_{CCS} = C(0) = 0.82$ , 而  $C_{GCS} = C(3.45) = 0.79$ ,  $C_{CCS} > C_{GCS}$ , 系统呈现完全同步。在图 4(b) 中,  $I_t = 18.66$  mA 所对应的  $\Delta f = 1.53$  GHz 时,  $C_{CCS} = C(0) = 0.52$ , 而  $C_{GCS} = C(3.45) = 0.61$ ,  $C_{GCS} > C_{CCS}$ , 即系统呈现广义同步。因此, 通过改变 DFB-TL 的电流使发射和接收激光器具有不同的频率失谐, 从而使系统实现不同的混沌同步状态。

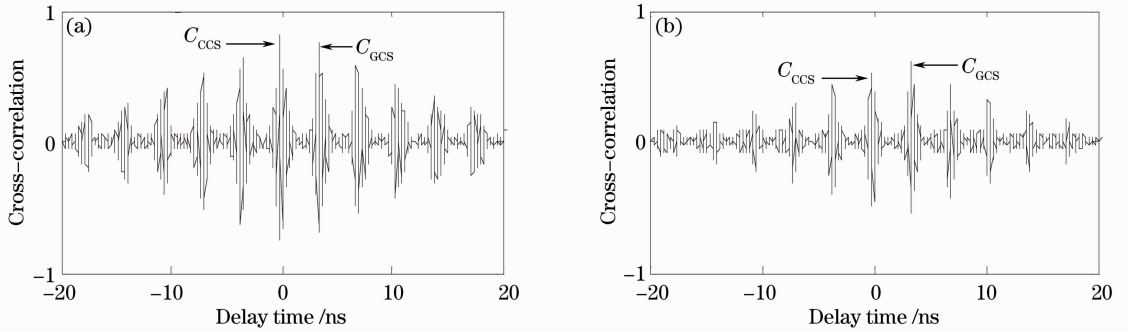


图 4 关联函数图

Fig. 4 Correlation function  $C$  as a function of delay time

实验中, 其它参数保持不变, 在小范围 (20.80 ~ 18.41 mA) 内通过改变 DFB-TL 的偏置电流可以获得 (-0.80 ~ 1.70 GHz) 范围内的频率失谐。图 5 给出了  $C_{CCS}, C_{GCS}$  随频率失谐的变化曲线。从图中可以看出: 在 -0.80 ~ -0.19 GHz 范围内以及 0.95 ~ 1.70 GHz 范围内,  $C_{GCS} > C_{CCS}$ , 系统呈现 GCS 态, 如  $\Delta f = -0.34$  GHz 时,  $C_{GCS} = 0.73$ ,  $C_{CCS} = 0.71$ 。进一步的, 在 -0.19 ~ 0.95 GHz 范围内,  $C_{GCS} < C_{CCS}$ , 系统处于 CCS 态, 如  $\Delta f = 0.36$  GHz 时,  $C_{CCS}$  达到最大值 0.84; 此时  $C_{GCS}$  也达到最大值 0.78。在  $\Delta f = -0.19$  GHz, 0.95 GHz 两处, 系统获得 CCS 态与 GCS 态的转换点。总体可见, 对于频率失谐, 系统的 CCS 状态明显比 GCS 状态更敏感。但同时, 在频率失谐较小时, CCS 状态可以获得比 GCS 状态更高的同步质量。

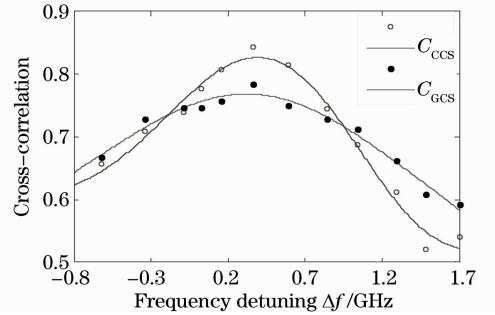


图 5  $C_{CCS}, C_{GCS}$  随频率失谐的变化

Fig. 5 Dependence of  $C_{CCS}$  and  $C_{GCS}$  on the frequency detuning

## 4 理论模拟与分析

基于外腔 DFB 半导体激光器的单向注入光混沌同步系统的理论模型可由以下速率方程组<sup>[12]</sup>来描述:

$$\frac{dE_t(t)}{dt} = \frac{1}{2}(G_N - \gamma_p)E_t(t) + kE_t(t - \tau)\cos[\omega_t\tau + \phi_t(t) - \phi_t(t - \tau)], \quad (4)$$

$$\frac{dN_t(t)}{dt} = \frac{I_t}{e} - \gamma_s N_t(t) - G_N |E_t(t)|^2, \quad (5)$$

$$\frac{d\phi_t(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha(G_N - \gamma_p) - k \frac{E_t(t - \tau)}{E_t(t)} \sin[\omega_t\tau + \phi_t(t) - \phi_t(t - \tau)], \quad (6)$$

$$\frac{dE_r(t)}{dt} = \frac{1}{2}(G_N - \gamma_p)E_r(t) + \eta_{12}E_t(t - \tau_c)\cos[\Delta\omega t + \omega_t\tau_c + \phi_r(t) - \phi_t(t - \tau_c)], \quad (7)$$

$$\frac{dN_r(t)}{dt} = \frac{I_r}{e} - \gamma_s N_r(t) - G_N |E_r(t)|^2, \quad (8)$$

$$\frac{d\phi_r(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha(G_N - \gamma_p) - \eta_{12} \frac{E_t(t - \tau_c)}{E_r(t)}\sin[\Delta\omega t + \omega_t\tau_c + \phi_r(t) - \phi_t(t - \tau_c)], \quad (9)$$

式中下标  $t, r$  分别代表 DFB-TL 和 DFB-RL。  $E$  为慢变场振幅,  $N$  为载流子数,  $k$  为反馈率,  $\eta_{12}$  为耦合率,  $\tau$  为反馈延迟时间,  $\tau_c$  为从 DFB-TL 到 DFB-RL 的传输延迟时间,  $\gamma_p$  为光子的损耗系数,  $\gamma_s$  为载流子的损耗系数,  $\alpha$  为线宽加强因子,  $G_N = g(N - N_0)/(1 + E^2/E_s^2)$  为增益常数,  $g$  为微分增益系数,  $N_0$  为透明载流子数,  $E_s$  为饱和光场,  $I$  为注入电流,  $\omega$  为自由运行激光器的角频率,  $\Delta\omega = \omega_t - \omega_r = 2\pi\Delta f$  是 DFB-TL 与 DFB-RL 之间的角频率失谐。

采用四阶龙格-库塔法对速率方程组(4)~(9)式进行数值求解. 计算中所用的参量取值如下:  $\tau = 3.45$  ns,  $\tau_c = 3.45$  ns,  $\alpha = 3$ ,  $\gamma_p = 2.38 \times 10^{11}$  s<sup>-1</sup>,  $g =$

$6.2 \times 10^3$  s<sup>-1</sup>,  $\gamma_s = 4.25 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>,  $E_s = 2.0352 \times 10^3$ ,  $N_0 = 1.25 \times 10^8$ ,  $C = 3.0 \times 10^8$  m/s,  $k = \eta_{12} = 22$  ns<sup>-1</sup>. 图 6(a), (b) 分别为  $I_t = 19.46$  mA 和 18.66 mA 时, DFB-TL, DFB-RL 输出的时间序列以及关联函数图. 根据图 6 可知: 当  $I_t = 19.46$  mA 时, 此时相应的频率失谐为 0.60 GHz, DFB-TL 和 DFB-RL 可实现较好的完全同步; 而当  $I_t = 18.66$  mA 时, 此时相应的频率失谐为 1.53 GHz, DFB-TL 与 DFB-RL 之间可实现时间移动为 3.45 ns 的 GCS 状态. 以上结果与实验结果图 3 吻合。

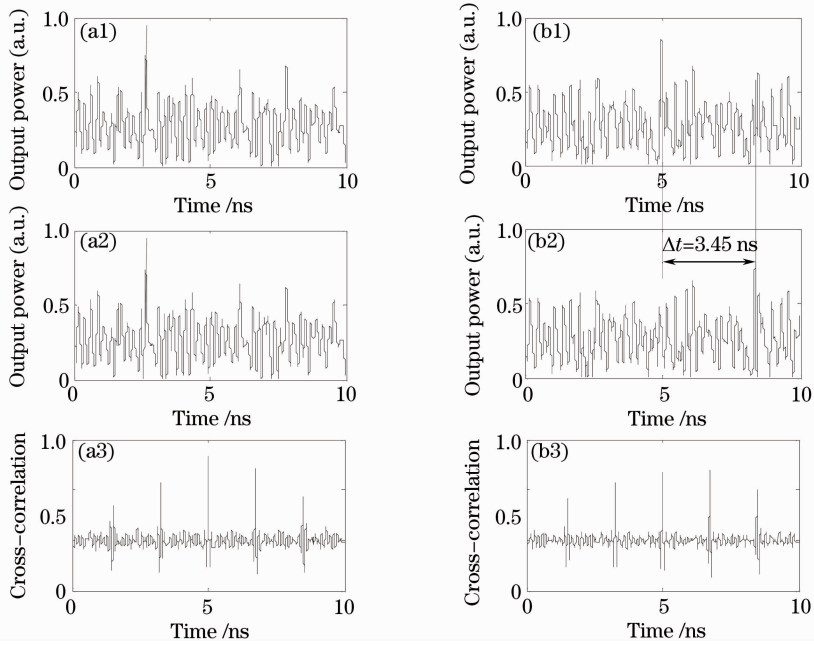


图 6 输出时间序列和关联函数图, 其中(a1), (b1)为 DFB-TL 的时间序列, (a2), (b2)为 DFB-RL 的时间序列, (a3), (b3)为关联函数图

Fig. 6 Output time series and correlation function  $C$ , where (a1), (b1) are the time series of DFB-TL, (a2), (b2) are the time series of DFB-RL, (a3), (b3) are the correlation function diagrams

图 7 为两激光器频率失谐在  $\pm 4$  GHz 范围内变化时(即 DFB-TL 的偏置电流从 24.0~16.7 mA 改变), 系统的同步状态. 在  $-4 \sim -1.72$  GHz 和  $1.28 \sim 4$  GHz 范围内, 系统表现为 GCS 态; 在

$-1.72 \sim 1.28$  GHz 范围内, 系统表现为 CCS 态. 在  $-1.72$  GHz 和  $1.28$  GHz 实现两个同步状态的转换. 理论模拟结果与实验结果具有相同的趋势, 但实验结果中 CCS 对应的频率失谐范围相对要小一些. 原因

在于理论模拟中 DFB-TL 和 DFB-RL 的内部参数均设为相同,而对于实际的激光器,由于存在内部参数的失配,从而导致 CCS 对频率失谐的要求更高一些。

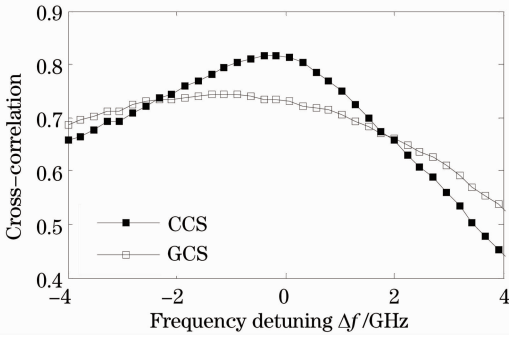


图 7  $C_{CCS}$  和  $C_{GCS}$  随频率失谐变化的理论仿真结果

Fig. 7 Theoretical simulations on variation of  $C_{CCS}$  and  $C_{GCS}$  with the frequency detuning

## 5 结 论

对光反馈 DFB 半导体激光器开环单向耦合混沌系统的同步状态进行了实验和理论研究。在实验过程中,通过微调 DFB-TL 的偏置电流来获得不同大小的频率失谐,观测到了 CCS 状态和 GCS 状态。通过连续调节 DFB-TL 的电流,实现了以上两种混沌同步状态的转变。利用相关的理论模型对该系统进行了理论分析,所得结果与实验结果趋势相同。

## 参 考 文 献

- 1 L. M. Pecora, T. L. Carroll. Synchronization in chaotic systems [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(8): 821~824
- 2 L. M. Pecora, T. L. Carroll. Driving systems with chaotic signals [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, **44**(4): 2374~2383
- 3 H. F. Chen, J. M. Liu. Open-loop chaotic synchronization of injection-locked semiconductor lasers with gigahertz range modulation [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(1): 27~34
- 4 Y. Takiguchi, K. Ohya, J. Ohtsubo. Bandwidth-enhanced chaos synchronization in strongly injection-locked semiconductor lasers with optical feedback [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(5): 319~321
- 5 R. Vicente, T. Pérez, C. R. Mirasso. Open-versus closed-loop performance of synchronized chaotic external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(9): 1197~1204
- 6 J. Ohtsubo. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **38**(9): 1141~1154
- 7 H. Fujino, J. Ohtsubo. Experimental synchronization of chaotic oscillations in external-cavity semiconductor lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9): 625~627
- 8 Y. Liu, Y. Takiguchi, P. Davis *et al.*. Experimental observation of complete chaos synchronization in semiconductor lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**(23): 4306~4308
- 9 I. V. Koryukin, P. Mandel. Two regimes of synchronization in unidirectionally coupled semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. E*,

- 2002, **65**(2): 1~5
- 10 M. W. Lee, J. Paul, I. Pierce *et al.*. Frequency-detuned synchronization switching in chaotic DFB laser diodes [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(3): 302~307
- 11 Qiu Xin, Xia Guangqiong, Wu Jiagui *et al.*. Investigation on frequency-detuning induced optical chaos synchronization switching [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1725~1729
- 邱鑫, 夏光琼, 吴加贵等. 基于频率失谐的光混沌同步开关的特性研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1725~1729
- 12 A. Locquet, F. Rogister, M. Sciamanna *et al.*. Two types of synchronization in unidirectionally coupled chaotic external-cavity semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(4): 1~4
- 13 A. Locquet, C. Masoller, C. R. Mirasso. Synchronization regimes of optical-feedback-induced chaos in unidirectionally coupled semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(5): 1~12
- 14 Y. Liu, H. F. Chen, J. M. Liu *et al.*. Synchronization of optical-feedback-induced chaos in semiconductor lasers by optical injection [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **63**(3): 1~4
- 15 A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger *et al.*. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber-optic links [J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343~346
- 16 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
- 张伟利, 潘伟, 罗斌等. 偏振选择互注入半导体激光器的混沌同步[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 55~60
- 17 Kong Huijun, Wu Zhengmao, Wu Jiagui *et al.*. Experimental investigation on the nonlinear dynamical characteristics of distributed feedback semiconductor lasers subjected to external optical injection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1490~1495
- 孔慧君, 吴正茂, 吴加贵等. 外部光注入分布反馈激光器的非线性动力学特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1490~1495
- 18 Yan Senlin. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 996~1001
- 颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 996~1001
- 19 Yan Senlin. Controlling chaos in semiconductor lasers by phase conjugation feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1043~1046
- 颜森林. 半导体激光器混沌相位共轭反馈控制方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1043~1046
- 20 Cao Liangping, Deng Tao, Lin Xiaodong *et al.*. Investigation on nonlinear dynamic behaviors of the distributed feedback semiconductor laser subjected to optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 939~943
- 操良平, 邓涛, 林晓东等. 光反馈分布反馈半导体激光器的非线性动力学动态行为[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 939~943
- 21 X. F. Wang, G. Q. Xia, Z. M. Wu. Theoretical investigations on the polarization performances of current-modulated VCSELs subject to weak optical feedback [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(1): 160~168
- 22 Ding Yanqing, Wang Anbang, Zhang Mingjiang *et al.*. Wavelength conversion of chaotic message through gain modulation by injection-locked Fabry-Perot laser diode [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(4): 368~371
- 23 J. G. Wu, G. Q. Xia, Z. M. Wu. Suppression of time delay signatures of chaotic output in a semiconductor laser with double optical feedback [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 20124~20133
- 24 J. Liu, Z. M. Wu, G. Q. Xia. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and

- polarization-rotated optical injection [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12619~12626
- 25 Guo Xiaodan, Fang Nian, Huang Zhaoming. Method of verifying chaos signal based on three-dimensional Wigner distribution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 139~142  
郭小丹, 方捻, 黄肇明. 基于三维 Wigner 分布的混沌信号判定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 139~142
- 26 Yan Senlin. Period chaos controlling in a gain-modulated semiconductor laser by delay polarization feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 297~301  
颜森林. 增益可调半导体激光器混沌偏振延时双反馈周期的控制方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 297~301
- 27 Feng Xiuqin, Yao Zhihai, Tian Zuolin *et al.*. Anti-control and synchronization of chaos in degenerate optical parametric oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 861~865  
冯秀琴, 姚治海, 田作林等. 简并光学参量振荡器的混沌反控制与混沌同步[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 861~865
- 28 Wang Yanbin, Zhang Shenghai, Mi Chaowei *et al.*. Chaos control in semiconductor laser with time-delayed opto-electronic feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 1968~1972  
王彦斌, 张胜海, 米朝伟等. 延时光电反馈法实现半导体激光器的混沌控制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 1968~1972
- 29 Gong Tian'an, Wang Yuncai, Kong Linqin *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