

非对称电流偏置下互耦半导体激光器的混沌同步特性研究*

何元 邓涛 吴正茂 刘元元 夏光琼†

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2010年5月17日收到; 2010年6月22日收到修改稿)

利用两个电流偏置在不同值的半导体激光器(SL)构建一个延时互耦系统, 实验研究了两个SL的非对称偏置电流和频率失谐 $\Delta f (=f_1 - f_2, f_1, f_2$ 分别对应SL1和SL2的自由振荡频率)对系统混沌同步性能的影响. 研究结果表明: 对于两个振荡频率一致的SL, 当两个SL的偏置电流差异较大时系统能实现较好的混沌同步; 通过调节两个SL的温度, 使两个SL的振荡频率失谐, 对于SL1电流远大于SL2电流的情形, 正频率失谐(即 $f_1 > f_2$)将使得系统的同步性能下降, 而适量的负频率失谐有助于进一步提高系统的同步性能. 理论仿真结果与实验结果基本符合.

关键词: 半导体激光器, 非对称电流偏置, 互耦, 混沌同步

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

1. 引言

自1990年Pecora和Carroll证明了混沌信号可以实现同步以来^[1], 混沌同步在信息保密传输中的应用一直是相关领域的研究热点. 由于半导体激光器(SL)在光反馈、光电反馈、外光注入、调制等外部扰动下可以产生复杂的混沌输出, 因此基于SL的混沌、混沌同步及通信备受相关学者的关注^[2-26]. 2005年, Argyris等利用商用光通信网络实现了1 Gbit/s、传输距离达120 km的单向激光混沌保密通信^[8]. 但在该系统中, 只允许信号由发射激光器单向传送到接收激光器. 显然仅能实现单向的保密通信是不够的, 信息的双向乃至多向传输才是混沌保密通信发展的必然趋势, 因此有必要对能实现双向混沌保密通信的互耦系统给予格外关注^[15-23]. 已有的研究表明由两个SL构成的对称互耦系统, 由于随机噪声的影响而不能实现稳定持久的混沌同步. 2006年, Klein等人通过给对称的两个互耦SL引入光反馈, 当反馈延迟时间等于耦合时间时, 系统实现了零时延混沌同步^[18]. 但由于该系统不仅要求两个SL的参数一致, 还需要精确控制反馈量

的大小, 从而增大了实验实施的难度. 最近, Zhang等人提出了由两个性能参数一致的SL构成的互耦系统, 利用两个方向的耦合系数的较大差异形成一个极不对称的互耦系统, 理论上研究了系统的双向混沌通信性能^[25, 26]. 但对于实际应用而言, 两个方向的耦合系数的极大差异需要在系统中增加额外的器件, 而且一部分光路还需要进行分离, 因而系统结构也会比较复杂.

在本文中, 我们基于两个SL构成的简单互耦系统, 通过两个SL电流的非对称偏置导致输出功率不同来实现非对称耦合. 实验研究了该系统的混沌同步特性, 以及两个SL之间的频率失谐对系统同步性能的影响. 理论研究结果与实验研究结果基本符合.

2. 实验装置

互耦半导体激光器系统的实验装置如图1所示. SL1的输出光经透镜AL1准直后, 被分束器BS1分成两束. 一束经过NDF与BS2后注入到SL2; 另一束经过光隔离器OI1后进入光纤耦合器FC1(分光比为20:80), 然后通过实时监测分析系统对系统

* 国家自然科学基金(批准号:60978003, 61078003), 中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:XDJK2009B010)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: gqxia@swu.edu.cn

的光谱、功率谱和时间序列进行数据采集和分析. 与 SL1 类似, SL2 的输出光经透镜 AL2 准直后, 被分束器 BS2 分成两束. 一束经过 NDF 与 BS1 后注入到 SL1; 另一束经过光隔离器 OI2 后进入 FC2 (分光比为 20:80), 其输出的信号同样被送入实时监测分析系统进行处理. 实时监测分析系统由高分辨率光谱仪 OSA (ANDO AQ6317C), 带宽为 12 GHz 的光电探测器 PD (New Focus 1544-B) 和带宽 6 GHz, 取样率为 20Gsa/s 的示波器 OSC (Agilent E54855A) 组成.

SL 的电流由精度为 $\pm 0.01\text{mA}$ 超低噪声电流源 (ILX-Lightwave, LDX-3620) 提供. 实验过程中, 通过控制 SL1, SL2 的偏置电流来实现 SL1 和 SL2 之间的非对称耦合, 耦合系数的大小可以通过中性密度滤波器 (NDF) 进行调节. 同时, 激光器的温度由精度为 $\pm 0.01\text{K}$ 的温控源 (ILX-Lightwave LDT-5412) 进行控制, 通过调节 SL 的温度, 可以调节 SL 的自由振荡频率. 在整个实验过程中, SL1 和 SL2 之间的耦合时间 $\tau = 3.45\text{ns}$.

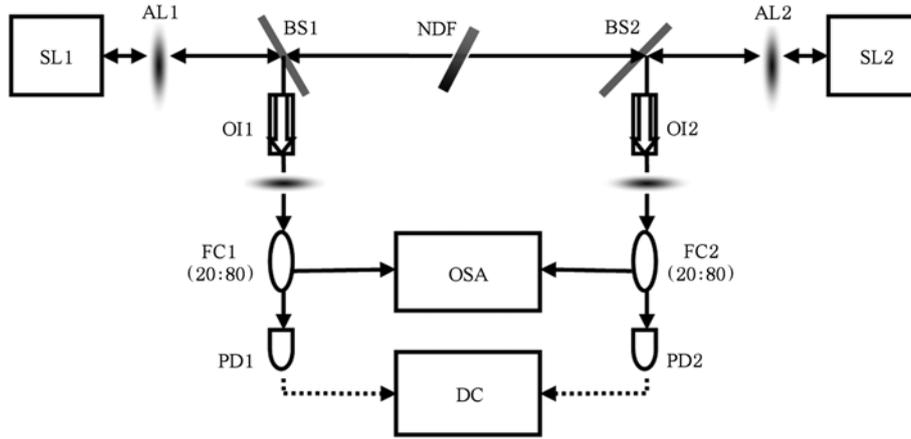


图1 互耦半导体激光器系统的实验装置. SL: 半导体激光器; AL: 透镜; BS: 分束器; OI: 光隔离器; PD: 光电探测器; NDF: 中性密度滤波器; FC: 光纤耦合器; OSA: 光谱分析仪; DC: 数字示波器. 图中实线表示光路, 虚线表示电路

3. 实验结果与分析

为了定量地描述 SL1 和 SL2 的同步性能, 引入互相关系数 $C^{[11]}$

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

3.1. 无频率失谐

实验所用的两只激光器的阈值电流分别为 $I_{th1} = 8.6\text{mA}$, $I_{th2} = 10.5\text{mA}$. 通过调节温控源可使两激光器自由运行时波长一致, 均为 1549.270nm . 图2为两激光器电流分别为 $I_1 = 1.62I_{th1}$, $I_2 = 1.27I_{th2}$ 时实验观测到的 SL1 和 SL2 的光谱、时间序列和功率谱. 为了便于观察比较, SL2 的时间序列经过了 3.45ns 的平移. 从图中可以看出两激光器光谱比自由运行时有很大地展宽, 时间序列混乱, 功率谱平滑, 表明激光器处于混沌态. 当 $\Delta t = \tau = 3.45\text{ns}$ 时, 相关

系数 C 达到最大值 0.8889 , 说明系统实现了较好的混沌同步, 且 SL1 混沌输出超前于 SL2 混沌输出. 这是因为两个激光器处于不同的偏置电流, 其输出功率存在较大差异, SL1 的输出功率远大于 SL2 的输出功率, 由于系统两个方向的耦合率相同, 因此 SL2 受到 SL1 较强的注入, 从而被 SL1 注入锁定, 故滞后于 SL1.

由于在该系统中, 互耦的非对称是通过两个激光器的偏置电流差异来实现的, 从而可以预计: 当两个激光器偏置电流不同时, 系统的混沌同步性能会发生变化. 图3给出了 SL1 和 SL2 偏置在不同电流下, 互相关系数随时间移动的变化曲线. 图3(a) 对应 $I_1 = 1.53I_{th1}$, $I_2 = 1.58I_{th2}$, 图3(b) 对应于 $I_1 = 1.54I_{th1}$, $I_2 = 2.17I_{th2}$. 当 $I_1 = 1.53I_{th1}$, $I_2 = 1.58I_{th2}$ 时, 系统近似为一个对称的互耦系统, 其互相关系数在零时延的两侧基本上呈现对称的分布, 两边的最大相关系数分别位于 -3.45ns , 3.45ns . 当 $I_1 = 1.54I_{th1}$, $I_2 = 2.17I_{th2}$ 时, 最大相关系数 0.8425 位于

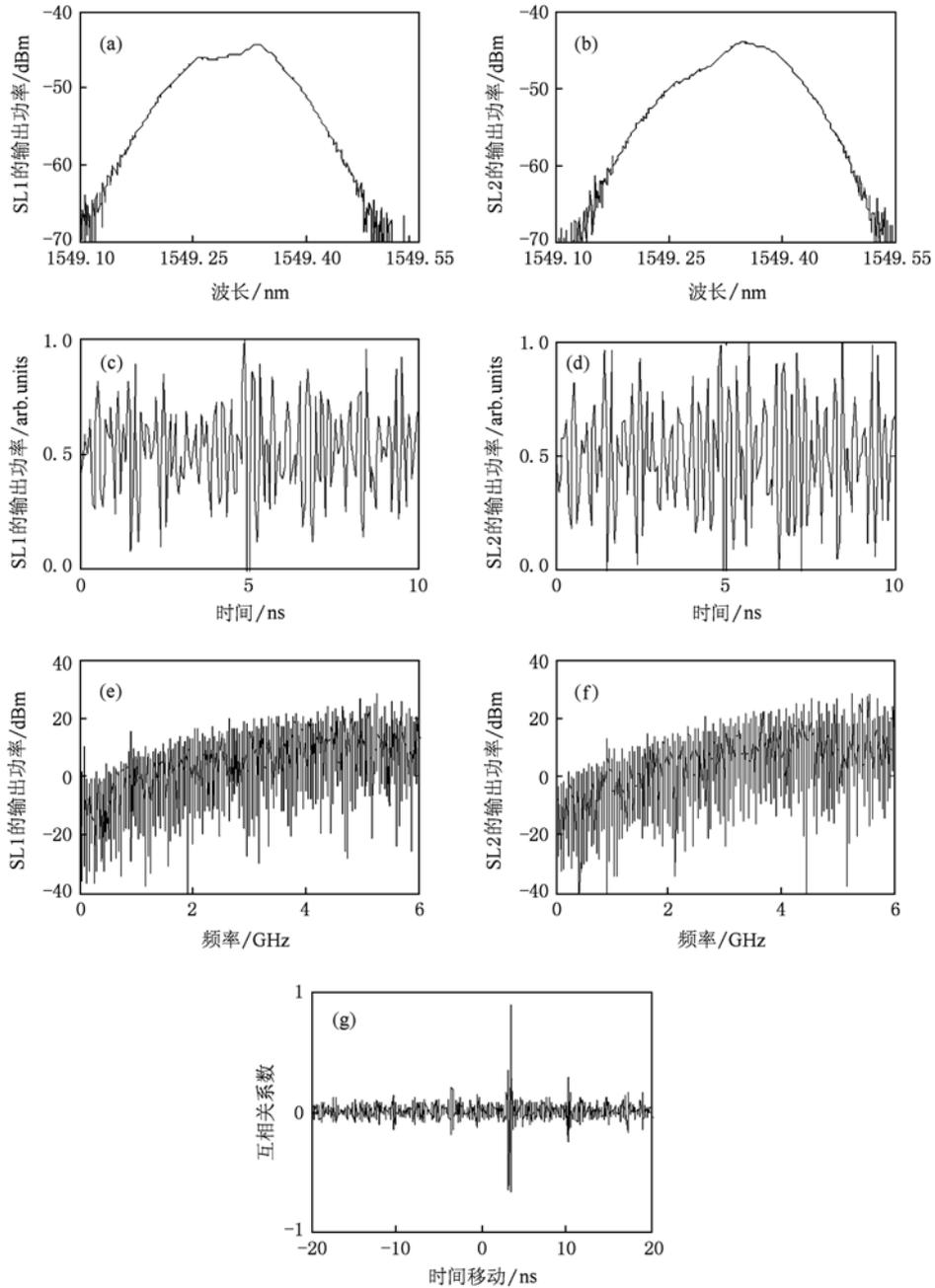


图2 当 $I_1 = 1.62I_{th1}$, $I_2 = 1.27I_{th2}$ 时, SL1 和 SL2 的光谱、时间序列、功率谱以及互相关函数. (a), (c), (e) 对应 SL1, (b), (d), (f) 对应 SL2

$\Delta t = -3.45$ ns, 说明此时 SL1 滞后于 SL2. 这是因为 SL1 受到相对更强的注入而被注入锁定, 故滞后于 SL2. 因此通过改变激光器的偏置电流可以改变系统的非对称度. 当两个激光器偏置电流相差较大时, 系统表现出明显的非对称性, 能获得较好的混沌同步, 其互相关函数呈现出明显的单峰性, 其中电流偏置大的激光器将超前于电流偏置小的激光器.

3.2. 有频率失谐

固定 SL1 的电流 $I_1 = 1.62I_{th1}$, 温度 $T_1 = 15.33^\circ\text{C}$, 以及 SL2 的电流 $I_2 = 1.27I_{th2}$, 通过调节 SL2 的温度来控制 SL1 与 SL2 之间的频率失谐大小. 图 4 给出了互相关函数的最大值 C_{\max} 随频率失谐 Δf ($\Delta f = f_1 - f_2$, f_1, f_2 分别为 SL1 和 SL2 自由运行时的频率) 的变化关系. 从图中可以看出, 在正频率

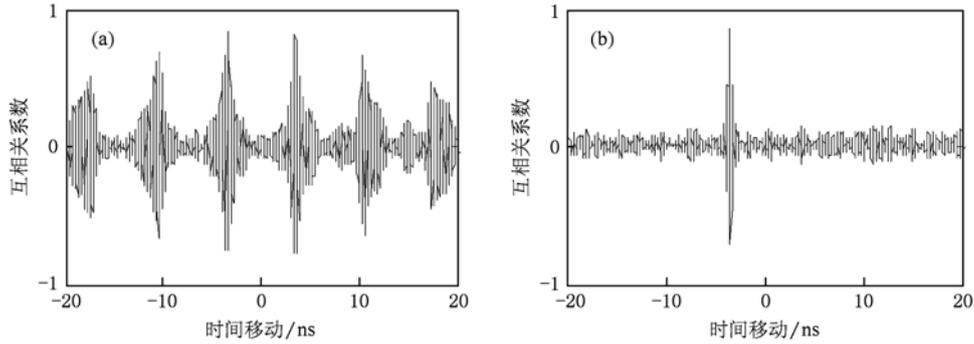


图3 SL1 和 SL2 的互相关函数 (a) $I_1 = 1.53I_{th1}, I_2 = 1.58I_{th2}$; (b) $I_1 = 1.54I_{th1}, I_2 = 2.17I_{th2}$

失谐条件下(即电流偏置大的激光器的振荡频率大于电流偏置小的 SL 的振荡频率),随着频率失谐量的增加, C_{max} 单调减小;而对于负频率失谐条件下,随着频率失谐量的增加, C_{max} 呈现先增大后减小的过程. 当 $\Delta f = -13$ GHz 时, C_{max} 达到最大值 0.9189. 由此可知在电流非对称偏置下,正失谐使得系统的同步性能降低,而适当的负失谐有利于提高系统的同步性能. 这是因为一定的负失谐有利于系统工作在注入锁定区,从而可提高了系统的同步性能.

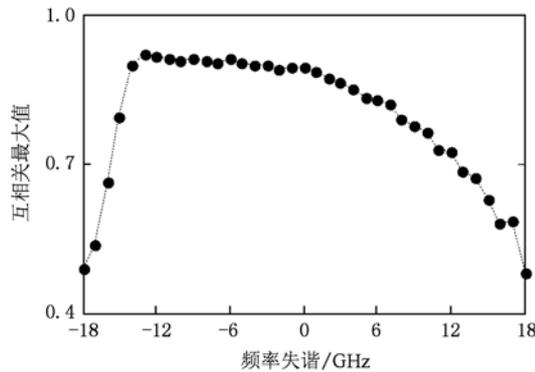


图4 $I_1 = 1.62I_{th1}, I_2 = 1.27I_{th2}$ 时互相关系数的最大值 C_{max} 随频率失谐 Δf 的变化情况

4. 理论模拟与分析

描述半导体激光器的动力学行为的速率方程组为^[17]

$$\begin{aligned} \frac{dE_1(t)}{dt} = & \frac{1}{2}(1 + i\alpha_1) \left[G_1 - \frac{1}{\tau_{p1}} \right] E_1(t) \\ & + \frac{k}{\tau_{in}} E_2(t - \tau) e^{-i2\pi(f_2\tau + \Delta f t)} \\ & + \sqrt{2\beta N_1(t)} \xi_{e1}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_2(t)}{dt} = & \frac{1}{2}(1 + i\alpha_2) \left[G_2 - \frac{1}{\tau_{p2}} \right] E_2(t) \\ & + \frac{k}{\tau_{in}} E_1(t - \tau) e^{-i2\pi(f_1\tau + \Delta f t)} \\ & + \sqrt{2\beta N_2(t)} \xi_{e2}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dN_{1,2}(t)}{dt} = \frac{I_{1,2}}{e} - \frac{N_{1,2}(t)}{\tau_s} - G_{1,2} |E_{1,2}(t)|^2, \quad (4)$$

式中,下标 1,2 分别代表 SL1 和 SL2, E, N 分别为激光器有源层光场慢变复振幅和载流子数, α 是线宽增强因子, τ_p, τ_s 分别是光子寿命和载流子寿命, f 是 SL 的自由运行频率, Δf 是 SL1 和 SL2 之间的频率失谐, τ_{in} 是腔内往返时间, k 和 τ 分别是两激光器之间的耦合系数和耦合延迟时间, I 是电流, e 是单位电荷, β 是自发辐射率, ξ_e 是场振幅高斯白噪声. G 为增益, 可表示为

$$G_{1,2} = \frac{g_{1,2}(N_{1,2} - N_0)}{1 + s |E_{1,2}|^2}, \quad (5)$$

式中 g 是线性增益系数, s 是增益饱和系数, N_0 是透明载流子数.

采用四阶龙格库塔法可对(2)–(4)式进行数值求解,计算中所用参数取值如下: $\alpha_1 = 3.3, \alpha_2 = 3.5, g_1 = 9.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}, g_2 = 8.4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}, \tau_{p1} = 3.1 \text{ ps}, \tau_{p2} = 2.7 \text{ ps}, \tau_{s1} = 2.5 \text{ ns}, \tau_{s2} = 2.2 \text{ ns}, \tau_{in} = 8 \text{ ps}, s = 1 \times 10^{-7}, N_0 = 1 \times 10^8, \beta = 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}, \tau = 3.45 \text{ ns}$. 图5给出了SL1 和 SL2 偏置在不同电流下,互相关系数随时间移动的变化曲线. 其中图5(a) 对应于 $I_1 = 1.53I_{th1}, I_2 = 1.58I_{th2}, k = 0.38$, 图5(b) 对应于 $I_1 = 1.54I_{th1}, I_2 = 2.17I_{th2}, k = 0.14$. 结果表明:当 $I_1 = 1.53I_{th1}, I_2 = 1.58I_{th2}$ 时,互相关系数在零时延的两侧基本上呈现对称的分布,两边的最大相关系数分别位于 $-3.45 \text{ ns}, 3.45 \text{ ns}$. 当 $I_1 = 1.54I_{th1}, I_2 = 2.17I_{th2}$ 时,最大相关系数位于 $\Delta t = -3.45 \text{ ns}$. 理论

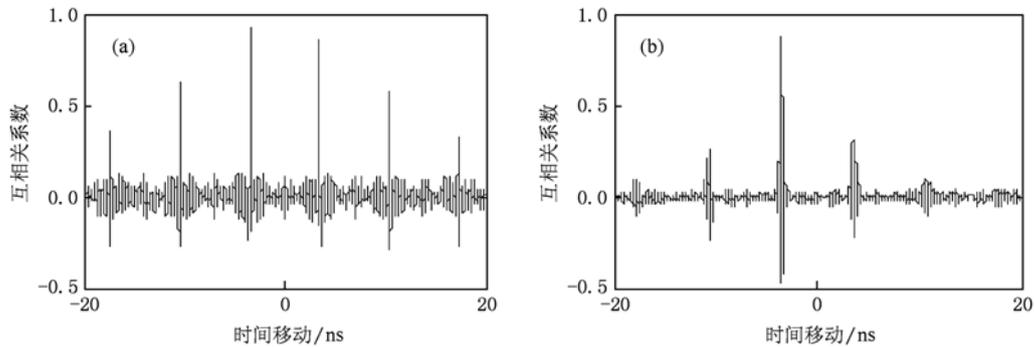


图5 SL1 和 SL2 的互相关函数 (a) $I_1 = 1.53I_{th1}, I_2 = 1.58I_{th2}, k = 0.38$; (b) $I_1 = 1.54I_{th1}, I_2 = 2.17I_{th2}, k = 0.14$

计算结果与实验结果(如图 3 所示)一致.

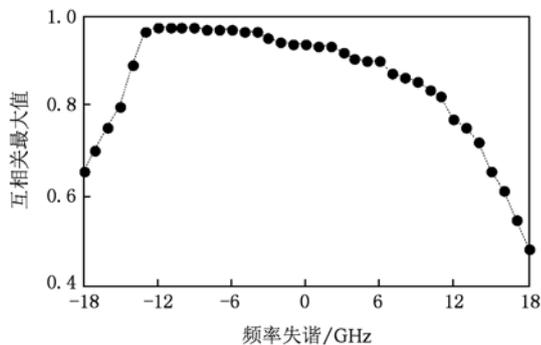


图6 $I_1 = 1.62I_{th1}, I_2 = 1.27I_{th2}, k = 0.3$ 时,互相关最大值随频率失谐的变化

图 6 给出了 $I_1 = 1.62I_{th1}, I_2 = 1.27I_{th2}, k = 0.3$ 时最大互相关系数随频率失谐的变化. 结果表明: 对于正频率失谐, 即偏置电流大的 SL1 的振荡频率大于偏置电流小的 SL2 的振荡频率, 随着正频率失谐量的增加, C_{max} 单调减小; 而对于负频率失谐, 随着失谐量的增加, C_{max} 先增大后急剧降低. 因此合适

的负失谐有利于进一步提高系统的同步性能, 模拟结果与实验结果基本相符.

5. 结 论

本文通过控制两个互耦半导体激光器的偏置电流, 实现两个激光器之间的非对称互耦合, 研究了非对称偏置电流以及频率失谐对系统同步性能的影响. 实验结果表明: 通过调节激光器的偏置电流可以改变系统的非对称度, 当两个激光器偏置电流相差较大时, 系统表现出明显的非对称性, 可以实现稳定持久的混沌同步, 电流非对称度的增加有利于系统同步性能的提高; 当两个 SL 的偏置电流极不对称的情况下, 频率失谐的大小对系统的同步性能也有一定的影响. 对于正的频率失谐, 系统的同步性能随失谐量的增大而单调降低. 而对于负频率失谐, 随着失谐量的增加, 互相关系数呈现先增大后减小的变化趋势. 因此, 适当的负失谐有利于实现系统的更完美混沌同步. 相应的理论模拟结果与实验结果基本符合.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Sivaprakasam S, Shore K A 1999 *Opt. Lett.* **24** 466
- [3] Rogister F, Locquet A, Pieroux D, Sciamanna M, Deparis O, Mégre P, Blondel M 2001 *Opt. Lett.* **26** 1486
- [4] Zhang X J, Wang B J, Yang L Z, Wang A B, Guo D M, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3203 (in Chinese) [张秀娟、王冰洁、杨玲珍、王安帮、郭东明、王云才 2009 物理学报 **58** 3203]
- [5] Lee M W, Paul J, Sivaprakasam S, Shore K A 2003 *Opt. Lett.* **28** 2168
- [6] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6878 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 6878]
- [7] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4669 (in Chinese) [王小发、夏光琼、吴正茂 2009 物理学报 **58** 4669]
- [8] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi-Lodi V, Colet P, Fischer I, García-Ojalvo J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **437** 343
- [9] Zhang J Z, Wang Y C, Wang A B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3264
- [10] 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]
- [11] Buldú J M, García-Ojalvo J, Torrent M C 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 640

- [12] Liu J, Wu Z M, Xia G Q 2009 *Opt. Express* **17** 12619
- [13] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [14] Wu J G, Xia G Q, Tang X, Lin X D, Deng T, Fan L, Wu Z M 2010 *Opt. Express* **18** 6661
- [15] Hohl A, Gavrielides A, Erneux T, Kovanis V 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 474
- [16] Fujino H, Ohtsubo J 2001 *Opt. Rev.* **8** 351
- [17] Heil T, Fischer I, Elsasser W, Mulet J, Mirasso C R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 795
- [18] Klein E, Gross N, Rosenbluh M, Kinzel W, Khaykovich L, Kanter I 2006 *Phys. Rev. E* **73** 066214
- [19] Vicente R, Mirasso C R 2007 *Opt. Lett.* **32** 403
- [20] Chen Z L, Zhou P, Xu X J, Hon J, Jiang Z F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3588 (in Chinese) [陈子伦、周朴、许晓军、侯静、姜宗福 2008 物理学报 **57** 3588]
- [21] Deng T, Xia G Q, Cao L P, Chen J G, Lin X D, Wu Z M 2009 *Opt. Commun.* **282** 2243
- [22] Gao Z C, Wu Z M, Cao L P, Xia G Q 2009 *Appl. Phys. B* **97** 645
- [23] Gross N, Kinzel W, Kanter I, Rosenbluh M, Khaykovich L 2006 *Opt. Commun.* **267** 464
- [24] Rogister F, Garacia-Ojalvo J 2003 *Opt. Lett.* **28** 1176
- [25] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [26] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 712

Investigations on chaos synchronization characteristics of mutually coupled semiconductor lasers with asymmetrical bias currents^{*}

He Yuan Deng Tao Wu Zheng-Mao Liu Yuan-Yuan Xia Guang-Qiong[†]

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

(Received 17 May 2010; revised manuscript received 22 June 2010)

Abstract

Based on a delayed mutually coupled system consisting of two semiconductor lasers (SL) with different injection currents, the influences of the asymmetric bias currents of two SLs and the frequency detuning Δf ($\Delta f = f_1 - f_2$, where f_1 and f_2 are the free frequencies of SL1 and SL2 respectively) on synchronization performance have been investigated experimentally. The results show that for the case of the two SLs with identical free oscillation frequencies, the mutually coupled system can achieve excellent chaos synchronization under relatively large asymmetrical injection currents. Furthermore, the frequency detuning, controlled by adjusting the temperature of one of the two SLs, has an obvious influence on synchronization performance. For the case of the SL1 biased at a relatively much larger current than that of SL2, the synchronization performance will degrade with the increase of the positive frequency detuning ($f_1 > f_2$), while the synchronization performance can be further improved with suitable negative frequency detuning. The simulated results are basically consistent with experimental results.

Keywords: semiconductor laser, asymmetrical bias current, mutual coupling, chaos synchronization

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. XDJK2009B010).

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