

链式互耦合半导体激光器的实时混沌同步*

刘莹莹[†] 潘炜 江宁 项水英 林煜东

(西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610031)

(2012年5月25日收到; 2012年8月30日收到修改稿)

通过在互耦合外腔半导体激光器之间增加中继激光器, 建立了一种链式互耦合半导体激光器混沌同步系统模型. 理论分析了系统的实时混沌同步条件, 数值研究了注入电流、互耦合条件、反馈条件等对系统实时混沌同步品质的影响, 揭示了同步质量在反馈强度和互耦合强度二维参数空间的分布规律. 结果表明: 注入电流较大时, 满足互耦合强度和反馈强度相同, 互耦合延时和反馈延时相等, 系统中所有激光器之间可同时实现稳定高品质实时混沌同步; 中心激光器和边激光器之间的稳定实时混沌同步分布在互耦合强度和反馈强度较小的区域以及互耦合强度和反馈强度相近的区域; 边激光器之间由于同时接收到中心激光器实施的不同注入, 能够较容易的实现稳定高品质的实时混沌同步. 该系统可进一步扩展成为实现远距离的双向实时混沌同步或阵列激光器系统的实时混沌同步.

关键词: 半导体激光器, 实时混沌同步, 链式互耦, 耦合强度

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.62.024208

1 引言

自1990年 Pecora 和 Carroll 率先提出混沌同步方案并实验证明混沌同步现象以来^[1], 混沌同步由于其在保密通信中的潜在应用而被广泛研究^[2,3]. 半导体激光器 (semiconductor laser, SL) 在外光注入和外光反馈等条件下能方便地产生复杂的混沌输出, 因此成为了激光混沌通信系统中重要发射源^[4-6].

互耦合半导体激光器混沌同步系统因其可以提高信息传输的保密性而成为了学者们的重点关注对象^[7-9]. 已有基于互耦合半导体激光器系统的稳定高品质的实时混沌同步和引导-延迟混沌同步相继被提出^[10-12]. 在已报道的互耦合半导体激光器混沌同步系统多数是由两个激光器组成, 实际应用中由于远距离传输的混沌信号会产生一定程度上的衰减, 可以采用引入第三个激光器作为中继器来尽量避免上述弊端^[13]. 2006年, 颜森林提出中继器设想, 理论证明了激光混沌中继系统的同步^[14]. 同年, Lee 工作组提出并通过实验证明了三个串联

的单向耦合半导体激光器系统中, 激光器两两之间均可获得完全同步^[15]. 2008年, Vicente 等人提出了三个串联的互耦合孤立的半导体激光器系统中, 两个边激光器之间可实现稳定的高品质的实时混沌同步^[16]. 然而, 单向耦合只适用于信息的单向传输, 因此, 设计出能够进行长远距离信息传输的双向混沌同步方案具有重要的理论意义.

本文通过在互耦合外腔半导体激光器之间增加中继激光器, 组成一种链式互耦合半导体激光器混沌同步系统模型, 建立相关速率方程模型, 理论分析系统实时混沌同步条件, 数值仿真研究系统实时混沌同步特性, 包括注入电流和互耦合强度以及反馈强度对实时同步品质的影响. 该系统所有激光器之间可同时获得稳定的高品质的实时混沌同步, 可用于扩展为实现远距离的双向实时混沌同步或阵列激光器系统的实时混沌同步.

2 系统结构及理论分析

2.1 系统结构

如图1所示, 链式互耦合半导体激光器混沌系

* 国家自然科学基金 (批准号: 60976039, 61274042) 和四川省基础研究项目 (批准号: 2011JY0030) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: liuyingying63@163.com

统主要由 SL_1 , SL_2 以及 SL_3 三个半导体激光器组成^[16]. 其中 SL_2 为中心激光器, SL_1 和 SL_3 为两个带反射镜 (EM) 的外腔半导体激光器, SL_1 , SL_2 以及 SL_3 之间通过一条链路实现互耦合.

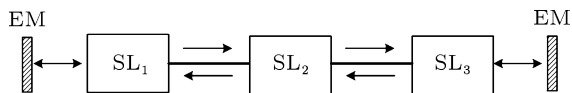


图1 链式互耦合半导体激光器系统结构图

2.2 速率方程描述及理论分析

在实际的研究中, 通常采用经典的 Lang-Kobayashi 速率方程来描述半导体激光器的输出特性^[17]. 经过拓展可得到描述基于链式互耦合半导体激光器混沌同步系统的速率方程组为

$$\frac{dE_1(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1+i\alpha) \left(G_1 - \frac{1}{\tau_p} \right) E_1(t)$$

$$\begin{aligned} &+ k_1 E_1(t - \tau_1) \exp(-i\omega_1 \tau_1) \\ &+ \gamma_1 E_2(t - T_1) \exp(-i\omega_2 T_1) \exp(-i\Delta\omega_1 t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_2(t)}{dt} = &\frac{1}{2}(1+i\alpha) \left(G_2 - \frac{1}{\tau_p} \right) E_2(t) \\ &+ \gamma_1 E_1(t - \tau_1) \exp(-i\omega_1 T_1) \exp(i\Delta\omega_1 t) \\ &+ \gamma_2 E_3(t - T_2) \exp(-i\omega_3 T_2) \exp(-i\Delta\omega_2 t), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_3(t)}{dt} = &\frac{1}{2}(1+i\alpha) \left(G_3 - \frac{1}{\tau_p} \right) E_3(t) \\ &+ k_2 E_3(t - \tau_2) \exp(-i\omega_3 \tau_2) \\ &+ \gamma_2 E_2(t - T_2) \exp(-i\omega_2 T_2) \exp(-i\Delta\omega_2 t), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dN_{1,2,3}(t)}{dt} = \frac{1}{q} - \frac{N_{1,2,3}(t)}{\tau_e} - G_{1,2,3} |E_{1,2,3}(t)|^2, \quad (4)$$

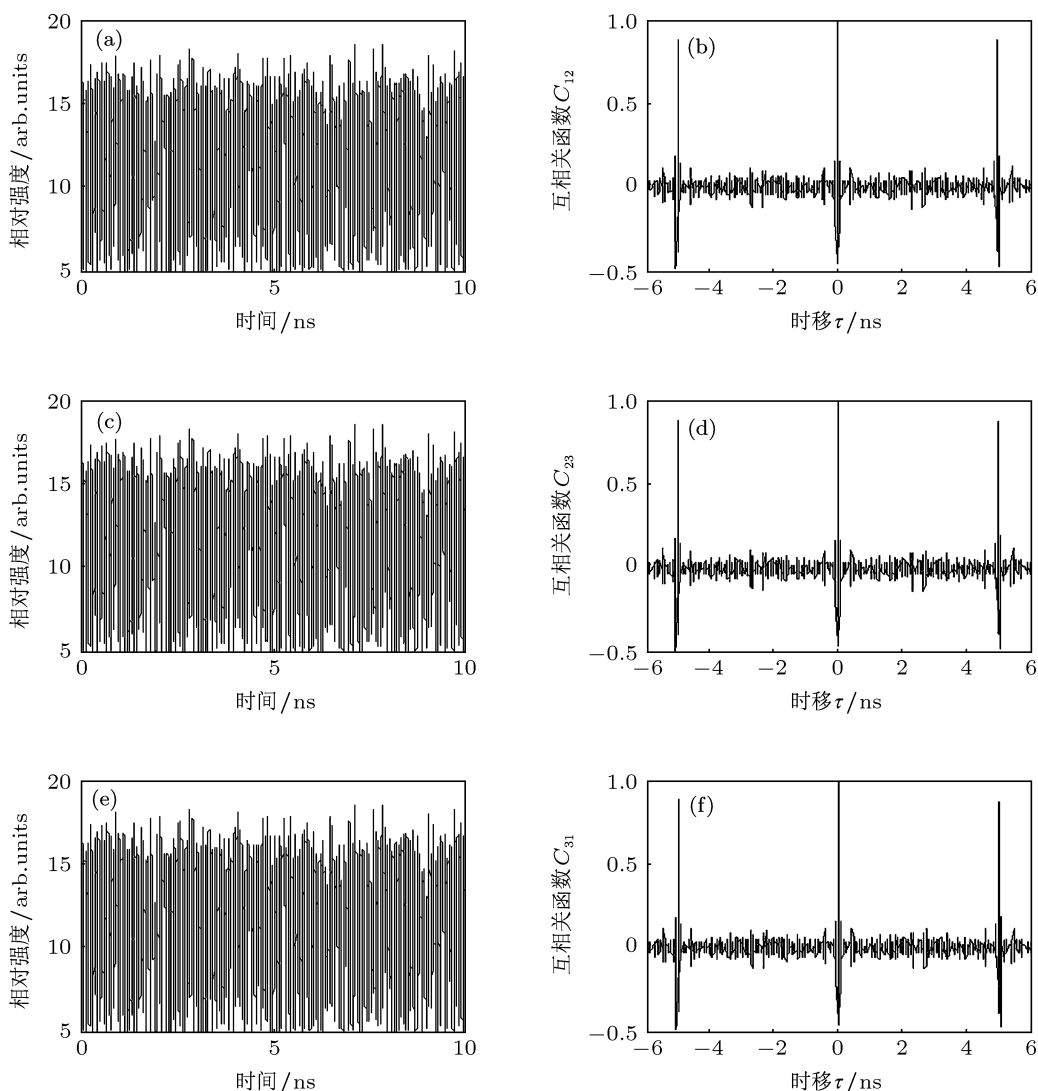


图2 激光器 SL_1 , SL_2 和 SL_3 时域输出及其互相关函数 (a)—(c) 分别为 SL_1 , SL_2 和 SL_3 时域输出; (e)—(f) 分别代表 SL_1 - SL_2 , SL_2 - SL_3 , SL_3 - SL_1 之间互相关函数曲线

其中, E, N 分别表示慢变复电场振幅和载流子数, 下标 1, 2, 3 分别代表激光器 SL_1, SL_2 和 SL_3 . I 为注入电流荷, q 是电子电, τ_p 为光器腔内光子寿命, α 是线宽增强因子, γ_1 和 T_1 分别是 SL_1 与 SL_2 之间互耦合强度和互耦合延时, γ_2 和 T_2 分别是 SL_2 与 SL_3 之间的互耦合强度和互耦合延时, τ_1 和 τ_2 分别为 SL_1 和 SL_3 的反馈延时, $\omega = 2\pi c/\lambda$ 是半导体激光器的工作角频率, c 是真空中光速, λ 为半导体激光器的工作波长, $\Delta\omega_1$ 为激光器 SL_1 和 SL_2 之间的失谐频率, $\Delta\omega_2$ 是 SL_3 和 SL_2 之间失谐频率, G 是光增益, 其定义为

$$G_{1,2,3}(t) = \frac{g(N_{1,2,3}(t) - N_0)}{1 + s|E_{1,2,3}(t)|^2} \quad (5)$$

其中 N_0 是透明载流子数, g 为差分增益, s 是增益压缩因子.

参照文献 [18] 中基于对称工作原理的分析方法以及文献 [11] 中的相关推导方式, 假设 SL_1, SL_2, SL_3 实时同步时, 它们之间满足如下关系:

$$E_1(t) = E_2(t) = E_3(t), \quad (6)$$

$$N_1(t) = N_2(t) = N_3(t). \quad (7)$$

将 (6) 和 (7) 式分别代入 (1)—(4) 式中, 得到链式互

耦合半导体激光器系统的同步理论条件如下:

$$k_1 E_1(t - \tau_1) + \gamma_1 E_2(t - T_1) = \gamma_1 E_1(t - T_1) + \gamma_2 E_3(t - T_2), \quad (8)$$

$$\gamma_1 E_1(t - T_1) + \gamma_2 E_3(t - T_2) = k_2 E_3(t - \tau_2) + \gamma_2 E_2(t - T_2). \quad (9)$$

(8) 式左边第一项和第二项分别表示 SL_1 的自身反馈和 SL_1 接收到来自 SL_2 的注入, 右边第一项和第二项分别表示 SL_2 接收到来自 SL_1 和 SL_3 的注入; (9) 式右边第一项和第二项分别表示 SL_3 的自身反馈和 SL_3 接收到来自 SL_2 的注入, 其左边与 (8) 式的右边相同.

(8) 式和 (9) 式结合 (6) 式可以进一步分解为

$$k_1 E_1(t - \tau_1) = \gamma_2 E_1(t - T_2), \quad (10)$$

$$\gamma_1 E_1(t - T_1) = k_2 E_1(t - \tau_2). \quad (11)$$

如果考虑对称反馈的情形, 可得到链式互耦合半导体激光器系统的实时混沌同步条件如下:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = k_1 = k_2, \quad (12)$$

$$T_1 = T_2 = \tau_1 = \tau_2.$$

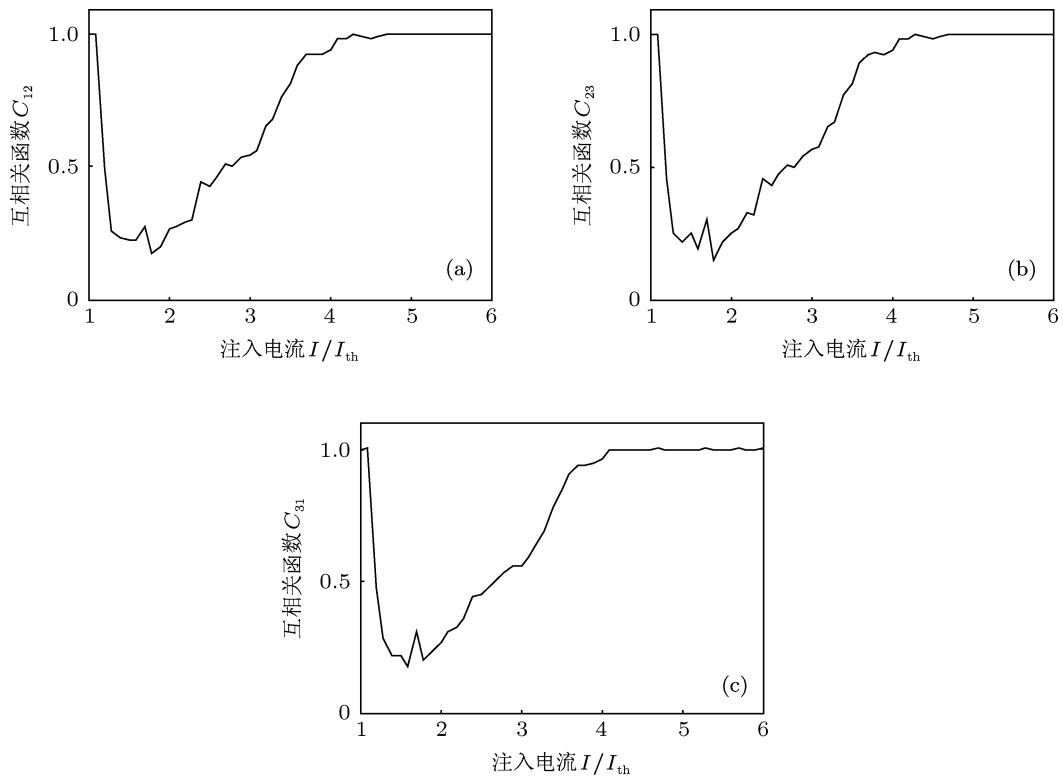


图3 激光器输出之间相关性随注入电流变化 (a)—(c) 分别代表 SL_1 - SL_2, SL_2 - SL_3, SL_3 - SL_1

上述分析说明, 满足所有互耦合强度和反馈强度相同, 所有互耦合延时和反馈延时相等, 如 (12) 式所示, 系统所有激光器之间可获得实时混沌同步.

为了量化系统两两激光器输出之间的同步质量, 定义互相关函数 C_{mn} 如 (13) 所示, 其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示求时间平均值, τ 表示激光器输出之间的平移时间, $P(t) = |E(t)|^2$ 代表激光器的输出强度, $m = 1, 2, 3$ 代表 SL_1, SL_2 和 SL_3 ; $n = 1, 2, 3$ 代表 SL_1, SL_2 和 SL_3 . C_{mn} 越接近 1, 表示同步品质越高 [9].

$$C_{mn} = \frac{\langle (P_m(t) - \langle P_m(t) \rangle) \cdot (P_n(t) - \langle P_n(t) \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (P_m(t) - \langle P_m(t) \rangle)^2 \rangle \cdot \langle (P_n(t) - \langle P_n(t) \rangle)^2 \rangle}} \quad (13)$$

下面, 通过四阶龙格-库塔算法, 对上述链式互耦合半导体激光器混沌系统的速率方程组进行数值求解. 基本仿真参数数值详见表 1 [9].

表 1 激光器典型参数值

线宽增强因子	α	5
差分增益	g/s^{-1}	1.5×10^4
光子寿命	τ_p/ps	2
载流子寿命	τ_c/ns	2
增益压缩因子	S	5×10^{-7}
阈值电流	I_{th}/mA	14.7
透明载流子数	N_0	1.5×10^8
激光器失谐频率	$\Delta\omega$	0
激光器工作波长	λ/nm	1550

3 仿真结果及分析

图 2 给出了系统激光器的时域输出及激光器两两之间的互相关函数曲线. 其中, 互耦合条件与反馈条件相同为 $T_1 = T_2 = \tau_1 = \tau_2 = 5$ ns, $\gamma_1 = \gamma_2 = k_1 = k_2 = 20$ ns⁻¹, 满足同步条件 (13) 式. 结果表明, 激光器输出均为杂乱无章的混沌态, 且 SL_1, SL_2 和 SL_3 的输出强度相等, 输出轨迹相同; 互相关函数均关于 $\tau = 0$ 对称, 且在该点的互相关值为最大值 1, 说明 SL_1, SL_2 和 SL_3 两两输出之间均达到实时混沌同步, 与上述理论分析相吻合, 图中 $\tau = \pm 5$ ns 处的次峰值是由互耦合和反馈所引起.

下面主要围绕注入电流、耦合条件、以及反馈条件对系统中激光器之间相关特性的影响, 详细讨论系统的实时混沌同步特性.

图 3 给出了系统中两两激光器输出相关性随注入电流的变化. 结果表明, 激光器两两之间输出相关曲线类似, 随着注入电流从阈值电流处逐渐增

加, 由于激光器所输出混沌信号的复杂度逐渐增大, 激光器输出之间的相关性逐渐降低, 在 $1.8I_{th}$ 附近出现最低值; 随着注入电流继续增加, 激光器输出相关性又开始逐渐增强, 当注入电流大于某个特定值后, 激光器输出相关性达到最大值 1 并保持在 1, 系统输出为实时混沌同步状态. 中间同步性能下降的情况, 是由半导体激光器的增益饱和和效应所引发的, 是一种普遍存在的经典现象 [19,20]. 为了确保系统能够获得高品质的实时混沌同步, 使得系统可以较长时间通信, 避免激光器输出混沌信号出现低频振荡情况下的幅度骤降现象 [21], 本文将 SL_1, SL_2, SL_3 的注入电流取值为 68 mA.

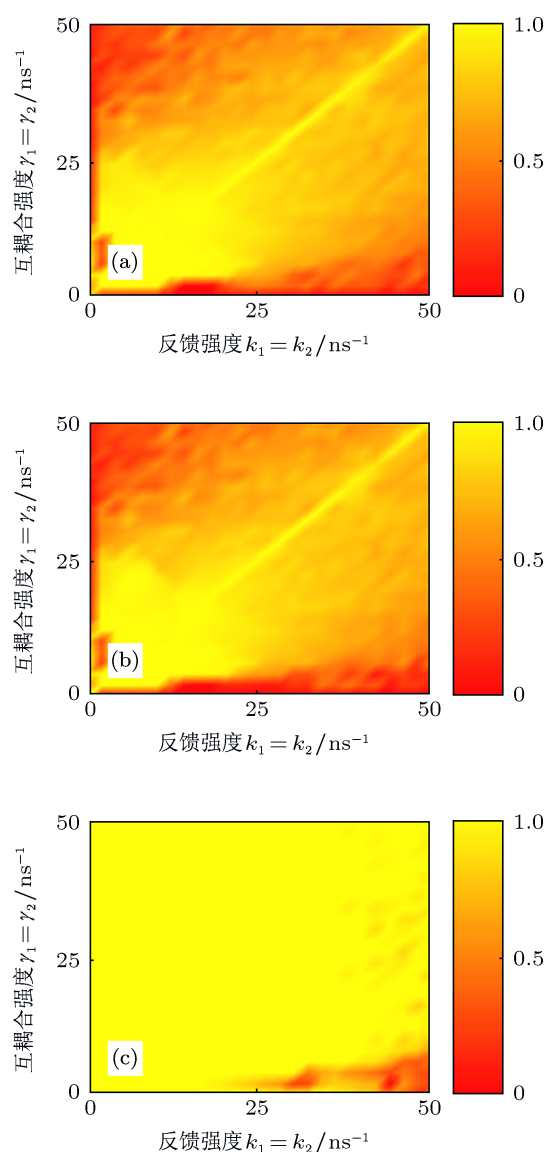


图 4 激光器输出相关性与互耦合强度和反馈强度的关系图 (a)–(c) 分别代表 SL_1 - SL_2, SL_2 - SL_3, SL_3 - SL_1

图 4 给出了激光器之间输出相关性与互耦合强度和反馈强度的关系曲线. 为保证系统对称性,

设定两个互耦合强度相等, 两个反馈强度相等, 并分别从 10 ns^{-1} 到 50 ns^{-1} 变化. 图 4(a) 和 (b) 表明, SL_1 - SL_2 和 SL_3 - SL_2 之间的同步区域分布情形相似, 边激光器和中心激光器之间在较低强度值区域内容易实现实时混沌同步; 随着强度值的逐渐增大, 由于系统反馈和注入交叉影响, 边激光器和中心激光器之间均只能在互耦合强度和反馈强度相近的情况下获得良好的实时混沌同步. 另一方面, 如图 4(c) 所示, 两个边激光器 SL_1 和 SL_3 之间能在很大的工作区域内实现高品质实时混沌同步, 这主要是由于 SL_1 和 SL_3 的反馈条件和互耦合条件分别对称, 两者始终工作在对称条件下, 因此能很容易地实现高品质的实时同步, 该方案可进一步扩展实现远距离的双向实时混沌同步或阵列激光器系统的实时混沌同步 [6].

4 结论

本文提出了一种链式互耦合半导体激光器混

沌同步系统模型, 建立了相关的速率方程模型, 理论分析了系统的实时混沌同步条件, 数值讨论了系统实时混沌同步特性, 揭示了同步质量在反馈强度和互耦合强度二维参数空间的分布规律. 结果表明, 满足所有互耦合强度和反馈强度相同, 所有互耦合延时和反馈延时相等时, 系统所有激光器之间可同时实现稳定高品质的实时混沌同步; 随着注入电流的增加, 由于增益饱和效应的影响, 系统同步品质将先下降再上升, 并最终保持在稳定的高品质水平; 中心激光器和边激光器之间的稳定实时混沌同步分布在互耦合强度和反馈强度较小的区域以及互耦合强度和反馈强度相近的区域; 两个边激光器由于同时接收到中心激光器实施的相同注入, 能够较容易的实现稳定高品质的实时混沌同步, 其对互耦合强度和反馈强度的要求不敏感; 该系统模型可进一步扩展成为实现远距离的双向实时混沌同步或阵列激光器系统的实时混沌同步.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys.Rev.Lett.* **64** 821
- [2] Ning J, Wei P, Lianshan Y, Bin L, Shuiying X, Lei Y, Di Z, Nianqiang L 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 1139
- [3] Ding L, Wu Z M, Wu J G, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 014212 (in Chinese) [丁灵, 吴正茂, 吴加贵, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 014212]
- [4] Wang Y C, Li Y L, Wang A B, Wang B J, Zhang G W, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4686 (in Chinese) [王云才, 李艳丽, 王安邦, 王冰洁, 张耕玮, 郭萍 2007 物理学报 **56** 4686]
- [5] 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]
- [6] Liu Y R, Wu Z M, Wu J G, Li P, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024203 (in Chinese) [刘宇然, 吴正茂, 吴加贵, 李萍, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 024203]
- [7] He Y, Deng T, Wu Z M, Liu Y Y, Xia G Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 044204 (in Chinese) [何元, 邓涛, 吴正茂, 刘元元, 夏光琼 2011 物理学报 **60** 044204]
- [8] Kanter I, Kopelowitz E, Kinzel W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 084102
- [9] Klein E, Gross N, Kopelowitz E 2006 *Phys. Rev. E* **74** 046201
- [10] Klein E, Gross N, Rosenbluh M 2006 *Phys. Rev.* **73** 066214
- [11] Ning J, Wei P, Bin L, Lianshan Y, Shuiying X, Lei Y, Di Z, Nianqiang L 2010 *Phys. Rev. E* **81** 066217
- [12] Englert A, Kinzel W, Aviad Y, Butkovski M, Reidler I, Zigzag M, Kanter I, Rosenbluh M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 114102
- [13] Lü L, Li G, Meng L, Yang M, Guo L, Zou J R, Li C Q, Chai Y 2010 *Chinese J. Lasers* **37** 2533 (in Chinese) [吕翎, 李钢, 孟乐, 杨明, 郭丽, 邹家蕊, 李春清, 柴元 2010 中国激光 **37** 2533]
- [14] 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]
- [15] Lee M W, Paul J, Masoller C, Shore K A 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 846
- [16] Vicente R, Fischer I, Mirasso C R 2008 *Phys. Rev. E* **78** 066202
- [17] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [18] Chiang M C, Chen H F, Liu J M 2006 *Opt. Commun.* **261** 86
- [19] Ning J, Wei P, Bin L, Lianshan Y, Shuiying X, Lei Y, Di Z, Nianqiang L 2011 *Opt. Lett.* **36** 3197
- [20] Vicente R, Dauden J, Colet P 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541
- [21] Heill T, Fischer I, Elsasser W 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 795

Isochronal chaos synchronization of a chain mutually coupled semiconductor lasers*

Liu Ying-Ying[†] Pan Wei Jiang Ning Xiang Shui-Ying Lin Yu-Dong

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 25 May 2012; revised manuscript received 30 August 2012)

Abstract

In this paper, a chaotic synchronization system model of a chain mutually coupled semiconductor lasers is established by adding a relay laser between the mutually coupled semiconductor lasers with cavity. The isochronal chaos synchronization condition is theoretically analysed. The influences of injection current, mutual coupling strength and feedback strength on isochronal chaos synchronization are numerically studied. The distributions of synchronous quality in the two-dimensional parameter space for mutual coupling strength and feedback strength are revealed. We show that when the injection current is big enough and the mutual coupling conditions and feedback conditions are completely the same, the stable isochronal chaos synchronization with high quality can be obtained among all the lasers. Stable isochronal chaos synchronization between central laser and side laser is distributed in the area when both mutual coupling strength and feedback strength are small or similar. Two side lasers can easily achieve the stable isochronal chaos synchronization with high quality, because they receive the same injection from central laser at the same time. The system model can be further expanded into the realizing of remote two-way isochronal chaos synchronization or the isochronal chaos synchronization of the arrayed semiconductor laser system.

Keywords: semiconductor laser, isochronal chaos synchronization, a chain mutually coupled, coupling strength

PACS: 42.55.Px, 42.65.Sf

DOI: 10.7498/aps.62.024208

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60976039, 61274042), and the Basic Research Program of Sichuan Province, China (Grant No. 2011JY0030).

[†] Corresponding author. E-mail: liuyingying63@163.com