

# 基于双光反馈半导体激光器的单向开环混沌同步通信\*

丁灵 吴正茂 吴加贵 夏光琼†

(西南大学物理学院, 重庆 400715)

(2011年1月16日收到; 2011年1月24日收到修改稿)

利用双光反馈半导体激光器作为混沌发射源, 构建了一个单向开环混沌通信系统, 并对系统的通信性能进行了相关仿真研究. 研究表明: 通过合理选取系统参量, 双光反馈半导体激光器所产生的混沌载波能很好地抑制外腔延时特征; 发射激光器和接收激光器在强注入锁定下能实现很好的混沌同步, 并且同步性能对频率失谐具有很好的容忍性; 采用附加混沌调制加密方式, 500 Mbits/s 的信号能够很好地隐藏于混沌载波中, 并可在接收端成功解调.

**关键词:** 半导体激光器, 单向耦合, 混沌通信

**PACS:** 42.65.Sf, 42.55.Px

## 1 引言

自 Pecora 和 Carroll<sup>[1]</sup> 首次提出混沌同步方案并证明了混沌信号可以实现同步以来, 混沌同步在保密通信方面的应用受到了越来越多的关注. 与传统加密方式相比, 混沌保密通信将加密过程从算法层降低到了物理层, 因而提高了通信的保密性<sup>[2]</sup>. 近 20 年来, 相关领域学者在基于固体激光器<sup>[3,4]</sup>、气体激光器<sup>[5]</sup>、掺铒光纤激光器<sup>[6]</sup> 以及半导体激光器等不同种类激光器的混沌输出、混沌同步以及通信等方面的研究中取得了众多突破性进展. 由于半导体激光器在光反馈、光电反馈、外光注入等外部扰动下很容易实现混沌输出, 所以基于半导体激光器的混沌、混沌同步及通信受到了人们的额外关注<sup>[7-21]</sup>. 其中, 光反馈外腔半导体激光器由于具有结构相对简单、易于实现两个以上正 Lyapunov 指数的超混沌输出从而具有比一般混沌输出更高的保密性等优点, 因此被认为是最好的混沌发射源之一<sup>[22]</sup>. 早期的光反馈外腔半导体激光器混沌系统大多利用单外腔光反馈使发射激光器产生混沌信号, 利用光注入技术实现收发两端激光器的混沌同步, 从而解调出隐藏于混沌载波中的

信息<sup>[2]</sup>. 但是, 随着人们对延时系统分析技术的不断提高, 使得从半导体激光器混沌输出中获取其外腔反馈延迟时间进而重构系统已成为可能<sup>[23-25]</sup>, 这在一定程度上给混沌保密通信的安全性带来威胁. 研究结果已表明: 通过选取合适的系统参数, 双光反馈半导体激光器系统不但能够很好地隐藏外腔反馈延时特征<sup>[15]</sup>, 而且其混沌输出比单光反馈半导体激光器系统的混沌输出具有更高的关联维数和更宽的带宽<sup>[26]</sup>. 因此, 如果基于双光反馈半导体激光器的混沌系统能实现较好的同步, 那么相比于一般单光反馈混沌同步通信系统而言, 该系统在通信容量以及保密性方面都将得到提高.

在本文中, 利用一个双光反馈半导体激光器 (TL) 作为发射源, 与无反馈的接收激光器 (RL) 构建了一个开环双光反馈半导体激光器单向耦合混沌同步通信系统, 并研究了系统的外部反馈特征的隐藏效果、系统的同步特性以及信息在该系统中的传输特性.

## 2 系统模型

图 1 为基于开环双光反馈半导体激光器的单

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 611780011, 11004161)、重庆市自然科学基金 (批准号: 2010BB9125) 和西南大学中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: XDJK2009B010, XDJK2010C021) 资助的课题.

† E-mail: gqxia@swu.edu.cn

向耦合混沌同步通信系统的结构示意图. 该通信系统是由一个双光反馈的半导体激光器以及一个与发射端激光器参数相似的无反馈半导体激光器单向耦合构建而成. 发射端由一个 TL 和两个反馈腔构成, 适当调节发射端的相关工作参数 (如两个外腔的腔长和反馈强度、激光器的偏置电流等) 可以使输出的混沌信号能很好地隐藏发射系统的外腔反馈延时特征<sup>[15]</sup>. 发射端输出的混沌信号经过光隔离器后传送到接收端, 被分束器分为两束: 一束注入到接收激光器; 另一束用于与接收激光器的混沌输出相减. 相减后的信号通过一个低通滤波器将高频成分滤掉, 最后得到传输的信息.

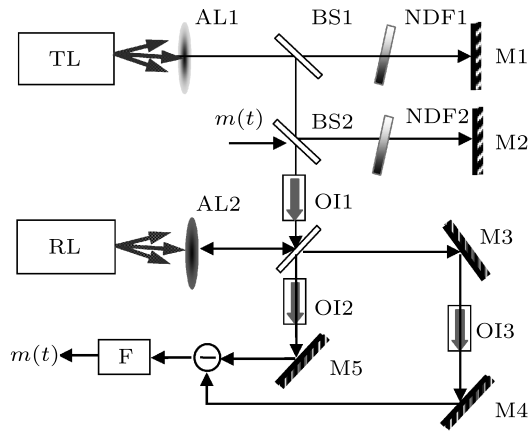


图 1 基于开环双光反馈半导体激光器的单向耦合混沌同步通信系统模型 TL, 发射激光器; RL, 接收激光器; AL, 准直透镜; BS, 分束器; OI, 光隔离器; NDF, 中性滤波器; M, 平面镜;  $m(t)$ , 加载信号; F, 低频滤波器

### 3 理论分析

描述单向耦合开环双光反馈半导体激光器混沌同步通信系统的理论模型可以用 L-K 速率方程进行表征<sup>[15]</sup>. 其中, 发射激光器的速率方程为

$$E_T(t) = \frac{1}{2}(1 - i\beta_T) \left[ G_T(t) - \frac{1}{\tau_{p,T}} \right] E_T(t) + \kappa_{1,T}/\tau_{L,T} E_T(t - \tau_{1,T}) e^{i\omega_T \tau_{1,T}}$$

$$+ \kappa_{2,T}/\tau_{L,T} E_T(t - \tau_{2,T}) e^{i\omega_T \tau_{2,T}} + F_T(t), \quad (1)$$

$$N_T = J_T N_T(t)/\tau_{N,T} - G_T(t) |E_T(t)|^2; \quad (2)$$

而接收激光器的速率方程为

$$E_R(t) = \frac{1}{2}(1 - i\beta_R) \left[ G_R(t) - \frac{1}{\tau_{p,R}} \right] E_R(t) + \kappa_{inj}/\tau_{L,R} E_T(t - \tau_{inj}) e^{i[\omega_T \tau_{inj} - (\omega_R - \omega_T)t]} + F_R(t), \quad (3)$$

$$N_R = J_R - N_R(t)/\tau_{N,R} - G_R(t) |E_R(t)|^2; \quad (4)$$

式中, 下标 R 和 T 分别表示 RL 和 TL, 下标 1, 2 分别代表反馈腔 1 和反馈腔 2;  $E$  为慢变场振幅,  $N$  为有源区内平均载流子数,  $\tau_p$  和  $\tau_N$  为光子寿命和载流子寿命,  $\beta$  为线宽增强因子,  $\tau_L$  为光在内腔的往返时间,  $\kappa_{inj}$  为系统耦合率,  $\tau_{inj}$  为耦合时间,  $\kappa_{1,T}$  和  $\kappa_{2,T}$  分别为 TL 的反馈腔 1 和腔 2 的反馈强度,  $\tau_{1,T}$  和  $\tau_{2,T}$  分别为 TL 的反馈腔 1 和腔 2 的外腔反馈延时,  $\omega_R$  和  $\omega_T$  分别为 RL 和 TL 圆频率.  $F(t) = \sqrt{2\alpha N} \xi$ , 其中  $\xi$  为 Gauss 白噪声,  $\alpha$  为自发辐射率.  $G(t) = g[N(t) - N_0]/[1 + \varepsilon |E(t)|^2]$  为增益系数, 其中  $g$  为微分增益系数,  $N_0$  为透明载流子数,  $\varepsilon$  为增益饱和系数. 运用 4 阶 Runge-Kutta 法对方程组求解, 其中 TL 各参量的值为  $\tau_p = 4.2$  ps,  $\tau_N = 1.6$  ns,  $\tau_L = 8.5$  ps,  $\beta = 4$ ,  $\omega_T = 1.216 \times 10^{15}$  rad/s,  $g = 2 \times 10^4$  s<sup>-1</sup>,  $N_0 = 1.25 \times 10^8$ ,  $\varepsilon = 1 \times 10^{-7}$ ,  $\alpha = 1.5 \times 10^{-5}$ ,  $J_T$  为 1.6 倍阈值电流; RL 各参量的值为  $\tau_p = 4.2$  ps,  $\tau_N = 1.6$  ns,  $\tau_L = 8.5$  ps,  $\beta = 4$ ,  $\omega_R = 1.216 \times 10^{15}$  rad/s,  $g = 2 \times 10^4$  s<sup>-1</sup>,  $N_0 = 1.25 \times 10^8$ ,  $\varepsilon = 1 \times 10^{-7}$ ,  $\alpha = 1.5 \times 10^{-5}$ ,  $J_R$  为 1.05 倍阈值电流.

常用于分析光反馈混沌系统延迟时间特征的方法有自相关函数、填充因子分析、互信息、局部线性模型等<sup>[13]</sup>. 本文通过混沌时间序列的自相关函数谱来分析外腔反馈延时信息, 自相关函数可定义为

$$C_s(\Delta t_s) = \frac{\langle [I(t + \Delta t_s) - I(t)][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{[\langle I(t) - \langle I(t) \rangle \rangle^2 \langle I(t + \Delta t_s) - I(t) \rangle^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

式中  $I(t)$  代表混沌输出时间序列,  $\Delta t_s$  代表移动时间,  $\langle \cdot \rangle$  表示对时间的平均.

发射激光器 TL 与接收激光器 RL 的同步性能由互相关函数表征, 互相关函数可定义为

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [I_T(t + \Delta t) - I_T(t)][I_R(t) - \langle I_R(t) \rangle] \rangle}{[\langle I_T(t) - \langle I_T(t) \rangle \rangle^2 \langle I_R(t + \Delta t) - I_R(t) \rangle^2]^{1/2}}, \quad (6)$$

其中  $I_T(t)$  和  $I_R(t)$  分别表示 TL 和 RL 的混沌输出时间序列,  $\Delta t$  代表时间位移,  $\langle \rangle$  表示对时间的平均.

### 4 结果与讨论

当 TL 的两外腔反馈强度为  $\kappa_{1,T} = \kappa_{2,T} = 0.045$ 、反馈时间分别为  $\tau_{1,T} = 3.427$  ns 和  $\tau_{2,T} = 3.335$  ns 时, 图 2 给出了 TL 混沌输出的功率谱 (a) 以及自相关函数 (b). 此时, 从功率谱和自相关函数曲线中无法获得 TL 的外腔延时反馈特征, 即 TL 的延时特征被很好地隐藏.

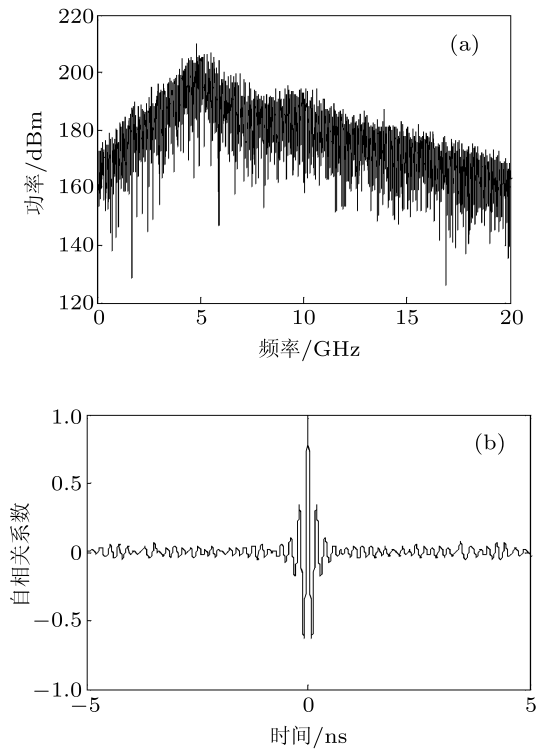


图 2 TL 的功率谱 (a) 和自相关函数 (b)

TL 输出的混沌信号通过单向耦合进入到接收激光器, 当耦合系数和耦合时间分别为  $\kappa_{inj} = 0.45$  和  $\tau_{inj} = 1.0$  ns 时, 图 3 给出了 TL, RL 输出的混沌时间序列 (图 3(a))、自相关曲线 (图 3(b)) 以及发射和接收激光器的互相关曲线 (c). 从图中可以看出, 发射和接收激光器的混沌输出都能很好地隐藏外腔反馈延时特征, 同时发射和接收激光器的互相关系数最大值达到了 0.96, 说明该系统能实现很好的混沌同步. 另外, RL 相比于 TL 的滞后同步时间为 1.0 ns, 刚好等于耦合时间, 因此该系统为强注入锁定混沌同步 [27].

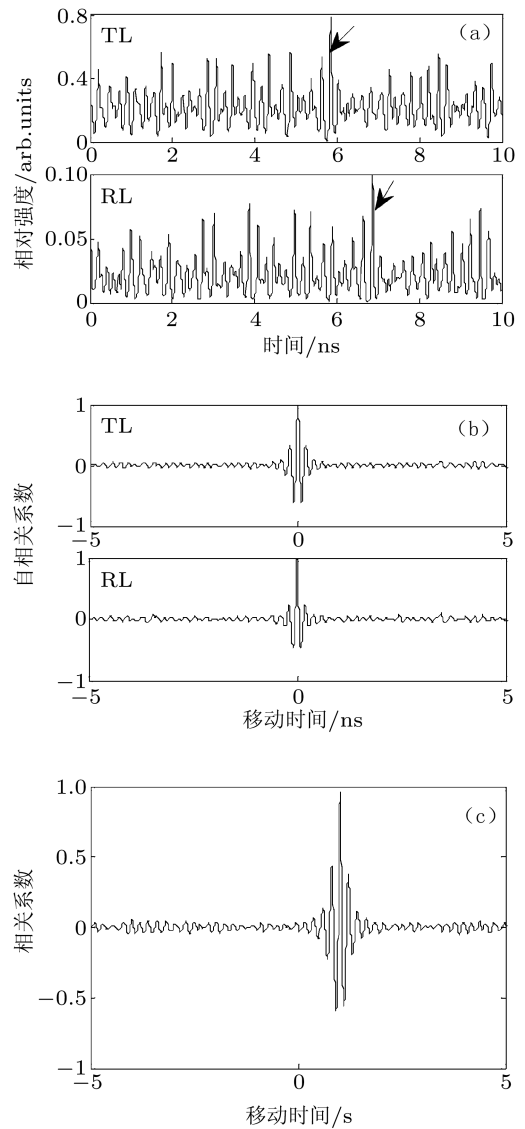


图 3 RL 与 TL 混沌输出的时间序列 (a) 和自相关函数 (b), 以及 RL 与 TL 的互相关函数 (c)

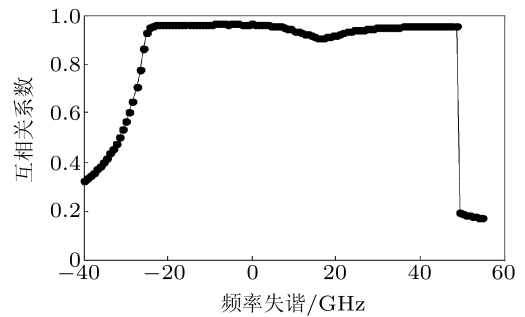


图 4  $\kappa_{inj} = 0.45$  时, TL 与 RL 的互相关系数随频率失谐的变化

图 4 给出了 RL 与 TL 混沌输出的互相关系数随频率失谐  $(\omega_R - \omega_T)/2\pi$  的变化关系. 虽然在失谐量约为 20 GHz 时互相关系数出现了一个极小值, 但此时系统的同步系数仍然大于 0.9. 从该图可看

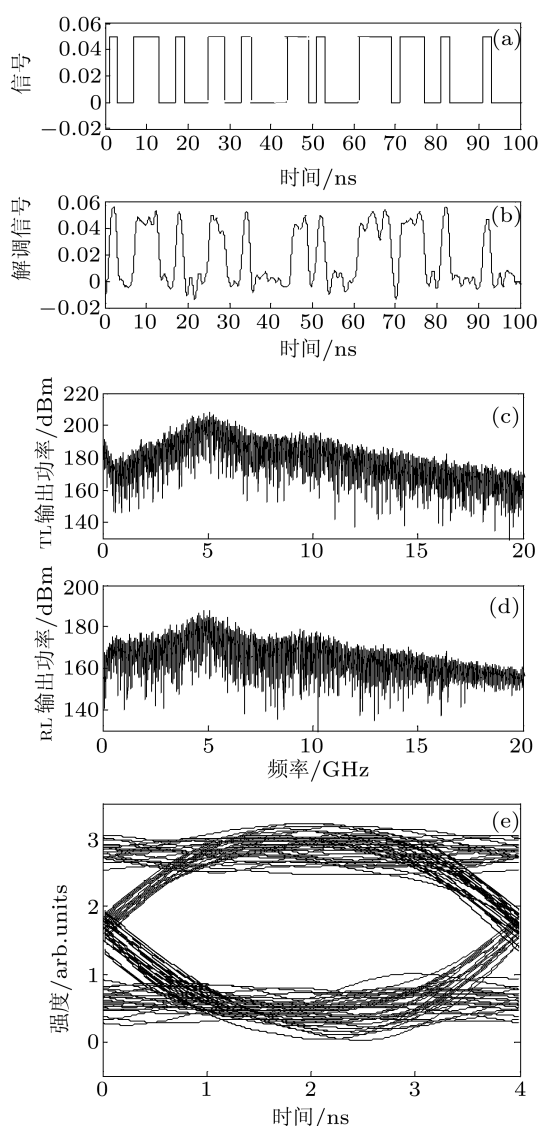


图5 加载的随机方波信号 (a) 与解调信号 (b), TL 和 RL 的功率谱 (c), (d) 以及解调信号对应的眼图 (e)

出, 频率失谐在  $-25$  GHz 到  $50$  GHz 这一较大范围内, 系统均能实现较好同步, 因此该系统对发射与接收激光器的频率失谐具有较好的容忍性.

图 5 给出了  $500$  Mbits/s 的随机方波信号, 如图 5 (a) 所示. 通过如图 1 所示的附加混沌调制方式加载到混沌载波后, 在接收端解调得到的信号如图 5 (b); RL 和 TL 对应的功率谱 (c), (d) 以及解调信号对应的眼图, 如图 5 (e) 所示. 计算中所用的系统参数与图 3 所用的参数相同. 结合图 5 (a), (b) 和 (d), 可以看出在发射端所加载的随机方波信号, 在接收端通过低通滤波器能够很好地解调. 同时, 图 5 (c) 和 (d) 还显示: 所加载的随机方波信号可以很好地隐藏在混沌载波中.

## 5 结论

提出了一个基于开环双光反馈半导体激光器的单向耦合混沌同步通信系统, 并利用相应的速率方程模型, 对混沌发射源发射的混沌载波对外腔反馈延时特征的隐藏效果以及系统的通信性能等开展了相关仿真研究. 研究表明, 在强注入锁定的条件下, 该系统能够实现较好同步; 系统的同步性能对发射和接收激光器之间的频率失谐具有很好的容忍性, 在注入强度  $\kappa_{inj} = 0.45$  时, 该系统在频率失谐为  $-25$  GHz 到  $50$  GHz 这一范围内均可获得高于  $0.9$  的混沌同步系数; 在混沌载波中加载的  $500$  Mbits/s 的随机信号在系统传输过程中能得到了很好的隐藏, 同时在接收端可被较好地实现解调.

- [1] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] 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
- [3] Wu L, Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [4] Sun J, Zhu S Q 2005 *Commun. Theor. Phys.* **43** 233
- [5] Sugawara T, Tachikawa M, Tsukamoto T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3502
- [6] Van Wiggeren G D, Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [7] Fan L, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 989 (in Chinese) [樊利, 夏光琼, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 989]
- [8] Murakami A, Ohtsubo J 2002 *Phys. Rev. A* **65** 33826
- [9] Buldú J M, García-Ojalvo J, Torrent M C 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 640
- [10] Oowada I, Ariizumi H, Li M, Yoshimori S, Uchida A, Yoshimura K, Davis P 2009 *Opt. Express* **17** 10025
- [11] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6878 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 6878]
- [12] Liu H J, Feng J C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1484 (in Chinese) [刘慧杰, 冯久超 2009 物理学报 **58** 1484]
- [13] Ortín S, Gutiérrez J M, Pesquera L, Vasquez H 2005 *Physica A* **351** 133
- [14] 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]
- [15] Wu J G, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [16] Tronciu V Z, Ermakov I V, Colet P, Mirasso C R 2008 *Opt. Commun.* **281** 4747
- [17] Klein E, Gross N, Rosenbluh M, Kinzel W, Khaykovich L, Kanter I 2006 *Phys. Rev. E* **73** 066214
- [18] Vicente R, Mirasso C R 2007 *Opt. Lett.* **32** 403
- [19] Cao L P, Xia G Q, Deng T, Lin X D, Wu Z M 2010 *Acta Phys.*

- Sin.* **59** 5541 (in Chinese) [操良平, 夏光琼, 邓涛, 林晓东, 吴正茂 2010 物理学报 **59** 5541]
- [20] Gross N, Kinzel W, Kanter I, Rosenbluh M, Khaykovich L 2006 *Opt. Commun.* **267** 464
- [21] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y, Zhou Z 2008 *Opt. Lett.* **33** 237
- [22] Vicente R, Daudén J, Colet P, Toral R 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 541
- [23] Bezruchko B P, Karavaev A S, Ponomarenko V I, Prokhorov M D 2001 *Phys. Rev. E* **64** 056216
- [24] Hegger R, Büchner J M, Kantz H 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 558
- [25] Zhao Q C, Wang Y C, Wang A B 2009 *Appl. Opt.* **48** 3515
- [26] Zhao Y F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6058 (in Chinese) [赵严峰 2009 物理学报 **58** 6058]
- [27] Wu L, Zhu S, Ni Y 2007 *Eur. Phys. J. D* **41** 349

# Unidirectional open-loop chaotic synchronization communication based on a semiconductor laser with double optical feedback\*

Ding Ling Wu Zheng-Mao Wu Jia-Gui Xia Guang-Qiong<sup>†</sup>

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

(Received 16 January 2011; revised manuscript received 24 January 2011)

## Abstract

Using a semiconductor laser with double optical feedback as a chaos transmitter, a unidirectional chaotic synchronization communication system is constructed, and the performances of such a system are investigated numerically. The results show that by selecting reasonable parameters, the time delay behaviour of chaotic carrier generated by the semiconductor laser with double optical feedback can be suppressed efficiently; through the strong injection from transmitter to receiver, the perfect synchronization between transmitter and receiver can be realized, and the synchronization quality has a high tolerance to frequency detuning between transmitted laser and received laser; under the additive chaos modulation encryption scheme, the 500 Mbits/s encoded message can be hidden efficiently in the chaotic carrier and successfully extracted at the receiver.

**Keywords:** semiconductor laser, unidirectional coupling, chaotic communication

**PACS:** 42.65.Sf, 42.55.Px

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011, 11004161), the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. 2010BB9125), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. XDJK2009B010, XDJK2010C021).

<sup>†</sup> E-mail: gqxia@swu.edu.cn