

# 激光混沌耦合反馈光电及全光逻辑门研究

颜森林<sup>†</sup>

(南京晓庄学院物理与电子工程学院, 南京 211171)

(2010年8月1日收到; 2010年8月23日收到修改稿)

理论上利用两个混沌半导体激光器的耦合反馈, 构建了两种基本的光电及全光门. 基本方法是, 让外部光注入到两个激光器中而导致激光混沌, 通过两激光器激光的相互耦合及反馈实现同步; 在这基础上, 一是让两激光器分别在电流调制下, 控制混沌同步或者非同步, 实现光电逻辑门的功能与计算; 二是利用光的外部调制方法让两相互耦合激光分别在相位调制下, 控制混沌同步或者非同步, 并最终实现全光逻辑门的功能与计算. 数值结果证明了两方法的可行性.

**关键词:** 混沌, 逻辑门, 激光器, 同步

**PACS:** 05.45.Gg, 05.45.Pq, 42.65.Sf, 42.55.Px

## 1. 引言

近十几年, 人们对混沌在保密通信中的应用以及在其他领域中的应用进行了广泛的研究<sup>[1-6]</sup>. 其中, 人们注意到激光混沌系统有大的带宽和低的衰减以及对参数具有极高的敏感性, 非常适合高速远程保密通信等<sup>[7,8]</sup>. 目前, 混沌及其在计算领域的新应用研究也引起人们高度重视<sup>[9-11]</sup>. 人们在研究中发现两混沌系统同步及非同步可以进行简单的数学计算以及进行简单的模拟逻辑运算. 如果混沌系统具有仿真或非逻辑门的能力, 那么, 它就可以进行基本的数学逻辑计算. 如适当组合多个这样的混沌或非逻辑门, 那么系统就具有多个函数功能的逻辑计算能力. 所以混沌或非逻辑门研究具有重要意义<sup>[9-11]</sup>. 最近, Chlouverakis 和 Adams 提出一个激光混沌耦合光电或非逻辑门<sup>[11]</sup>. 虽然耦合能使两混沌激光器同步, 但是耦合也能改变激光器混沌状态, 特别是对激光器进行调制时, 也有可能影响系统同步以及系统工作稳定性<sup>[12-15]</sup>. 所以, 激光混沌及其在逻辑计算中的应用还要做进一步深入研究.

在本文中, 我们提出激光混沌耦合反馈光电及全光逻辑门. 由于耦合反馈, 激光动力学行为不受外界影响且同步能力增强. 由于进行激光外部调制, 激光器工作稳定性能不受调制状态影响, 同时

有利于光器件集成.

## 2. 模型

外部光注入半导体激光器在理论和实验上有着广泛研究, 随着外部光注入增加, 激光呈现出分岔、混沌等多种复杂动力学行为<sup>[16,17]</sup>. 在我们研究中, 让一个主激光器驱动两个副激光器到混沌态, 然后让两个副激光器输出一部分光到对方激光器中以实现两个激光器耦合<sup>[11-15]</sup>. 由于耦合会改变激光动力学行为并有可能影响激光调制解调, 为了消除这种附加影响, 我们让两副激光器各增加一个反馈回路, 通过耦合-反馈的相互作用, 两激光器混沌状态能够保持同步且同步能力得到进一步增强<sup>[11-15]</sup>. 图1显示激光混沌耦合反馈光电及全光基本逻辑门模块组合. 当对两副激光器进行电流调制时, 该系统可以进行混沌光电逻辑门的计算. 当对两副激光器输出到对方激光器的光进行调制时, 该系统可进行混沌全光逻辑门的计算. 两副激光器动力学行为可以下列方程组描述<sup>[12-17]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dt} = & \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{K}{\tau_L}E_m \cos(\phi_1) \\ & + \frac{k_1}{\tau_L}[E_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) - E_1], \end{aligned}$$

<sup>†</sup> E-mail: yansenlinbsh@sina.com

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_1}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_m}{E_1} \sin(-\phi_1) \\ &\quad + \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\phi_2 - \phi_1) - \Delta\omega, \\ \frac{dN_1}{dt} &= \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2; \\ \frac{dE_2}{dt} &= \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{K}{\tau_L}E_m \cos(\phi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\quad + \frac{k_2}{\tau_L}[E_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) - E_2], \\ \frac{d\phi_2}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L}E_m \sin(-\phi_2) \\ &\quad + \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\phi_1 - \phi_2) - \Delta\omega, \\ \frac{dN_2}{dt} &= \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - GV_pE_2^2. \end{aligned} \quad (2)$$

表 1 激光器参量

参量	值	参量	值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350	饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	$1.6619 \times 10^{11}$
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2	增益常数 $\alpha/\text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{-16}$
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15	光线宽增强因子 $\beta_c$	6
压缩和限制因子 $\Gamma$	0.29	驱动电流 $I/\text{mA}$	25
群速折射率 $n_g$	3.8	频率失谐 $\Delta\omega/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	$2\pi \times 10^9$
光子损耗系数 $\alpha_m/\text{cm}^{-1}$	49	激光透明时载流子密度 $n_{th}/\text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
非辐射复合速率 $A_{nr}/\text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$	注入光场强 $E_m$	$0.125E_s$
辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-10}$	光注入系数 $K$	0.03
俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	$3.5 \times 10^{-29}$	光耦合反馈系数 $k$	0.1

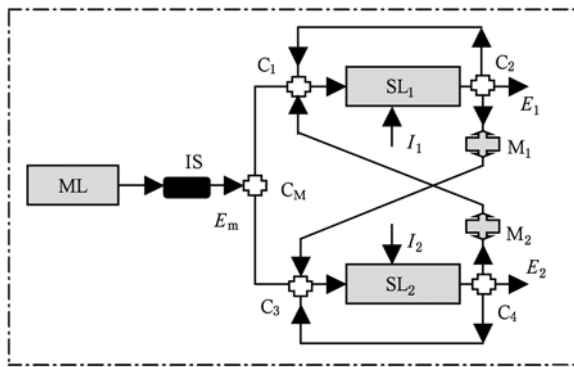


图 1 光电及全光逻辑门(其中,ML是主要激光器,SL<sub>1</sub>及SL<sub>2</sub>是两个副激光器.C<sub>M</sub>,C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>,C<sub>3</sub>,C<sub>4</sub>是分光耦合器.M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>是光调制器)

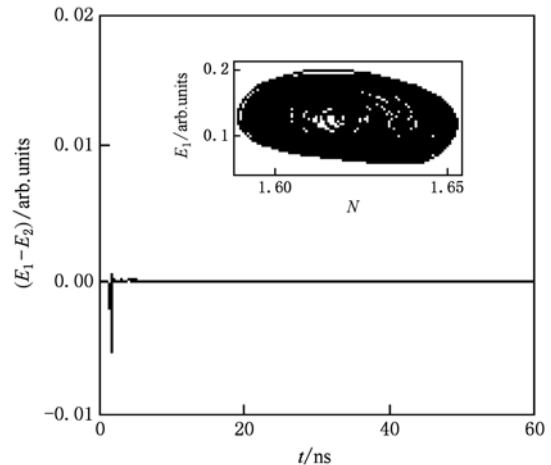


图 2 同步(其中,插入图是激光混沌吸引子)

其中,角标“1”和“2”代表两副激光器.  $E$  是激光场慢变部分,  $N$  是激光器载流子数.  $\beta_c$  是光线宽增强因子.  $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$  是载流子非线性损耗速率,  $A_{nr}$  是非辐射复合速率,  $B$  是辐射复合因子,  $C$  是俄歇复合因子.  $\tau_L = 2n_gL/c$  是光在激光器腔长  $L$  内来回一周的时间,  $c$  是真空中光速,  $n_g = c/v_g$  是激光器群速折射率.  $\gamma_p = v_g\alpha_m$  是光子损耗速率,  $\alpha_m$  是光子损耗系数.  $I$  是驱动电流.  $q$  是单位电荷. 激光模式增益为  $G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th})/\sqrt{1 + E^2/E_s^2}$ , 其中,  $a$  是增益常数,  $\Gamma = V/V_p$  是压缩和限制因子,  $V$  是腔体积,  $V_p$  是激光模式体积,  $N_{th} = n_{th}V$  是激光透明时的载流子数,  $n_{th}$  是它的密度值,

$E_s$  是饱和光子场强.  $E_m$  是注入光强度,  $\Delta\omega$  是注入光和激光频率失谐,  $K$  是光注入系数.  $k$  是光耦合-反馈系数. 数值模拟时选取表 1 激光器参量<sup>[13-17]</sup>. 如取  $I_1 = I_2 = I, k_1 = k_2 = k$  时, 图 2 是系统的激光混沌同步. 该系统可作为逻辑门组织单元基础. 我们知道, 在混沌保密通信中, 混沌键控是混沌编码的一种方法, 通过对混沌发射系统中的某个参数进行键控编码, 混沌载波被调制后进行保密传输, 然后接收系统对发射信号进行同步解调, 实现信息信号提取<sup>[18-23]</sup>. 利用混沌键控编码方法, 一是让两激光器分别在电流调制控制下, 实现混沌同步或者非同步, 实现光电逻辑门的功能与计算; 二是利用光的

外部调制让两相互耦合激光分别在相位调制控制下实现混沌同步或者非同步,并最终实现全光逻辑门的功能与计算.

### 3. 光电逻辑门

#### 3.1. 双电流调制实现光电同或门

首先让两激光器分别在电流调制控制下,利用混沌同步或者非同步,去实现光电同或逻辑门的功能与计算.这个技术方案是激光混沌键控编码的改进方案:如设置两副激光器驱动电流强度在值  $I$  到  $(1 + 2\%)I$  之间变化.当  $I_1 = I_2$ ,两激光器就可实现

同步;当  $I_1 \neq I_2$ ,两激光器是非同步.通过观测激光同步和非同步,就可进行同或计算.如同步代表“1”,非同步代表“0”,这样通过两激光器输出激光的同步解调,系统就具有“同”与“或”的逻辑计算功能.结果如图3所示,其中,(a)是  $SL_1$  电流调制信号  $S_1$  形式,该电流调制方式是  $I_1 = S_1 \times I$ ; (b)是  $SL_2$  电流调制信号  $S_2$  形式,该电流调制方式是  $I_2 = S_2 \times I$ ; (c)是混沌同步解调,其中,  $(E_1 - E_2)$  表示两激光器输出光的相减; (d)是观察到同步与非同步后的逻辑信号输出.数值结果证明了系统可以进行双电流调制实现同或逻辑门的计算,系统运行操作是可以实现的,该光电同或门设计方案是可行性的.

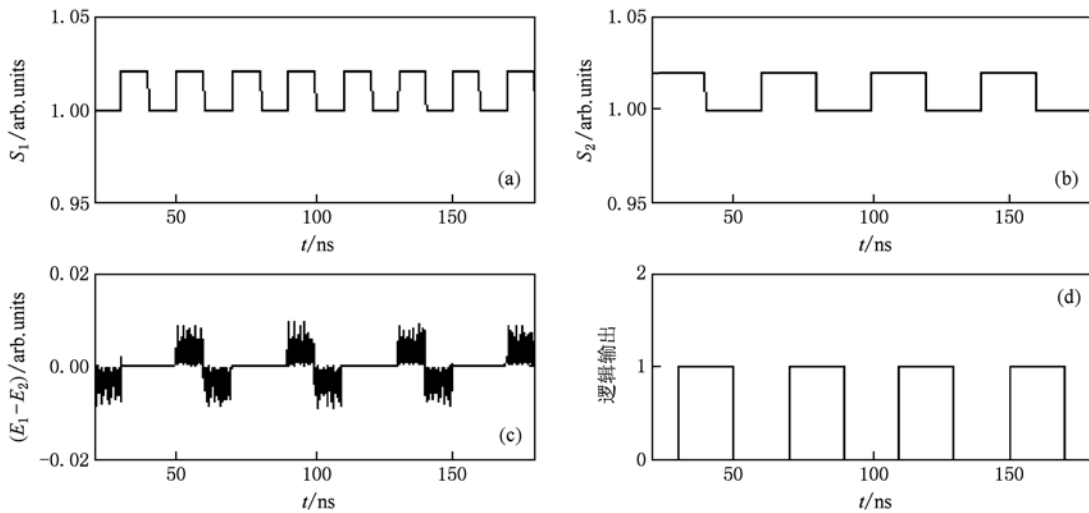


图3 双电流调制 (a)  $SL_1$  电流调制信号; (b)  $SL_2$  电流调制信号; (c) 同步解调; (d) 逻辑信号输出

#### 3.2. 单电流调制实现光电非门

仅让一个激光器进行电流调制控制,也可利用混沌同步或者非同步,去实现光电非门的逻辑功能与计算.这个技术方案就是利用传统的激光混沌键控编码方法,如设置一个激光器驱动电流强度在值  $I$  到  $(1 + 2\%)I$  之间变化,而另一个激光器驱动电流强度控制在值  $I$  上.当  $I_1 = I_2$ ,两激光器就可实现同步;当  $I_1 \neq I_2$ ,两激光器是非同步.同样通过观测系统同步和非同步,系统就具有“非”的逻辑计算功能.数值计算中,如激光同步代表“1”,非同步代表“0”,系统就可进行“非”的逻辑计算.结果如图4所示,其中,  $SL_1$  驱动电流强度在值  $I$  到  $(1 + 2\%)I$  之间变化,  $SL_2$  驱动电流强度控制在  $I$  上. (a)是  $SL_1$  电流调制信号  $S_1$  形式,该电流调制方式是  $I_1 = S_1 \times$

$I$ ; (b)是混沌同步解调; (c)是逻辑信号输出.数值结果证明了系统可以进行单电流调制实现光电非逻辑门运行操作.

### 4. 全光逻辑门

#### 4.1. 双相位调制控制下的全光同或逻辑门

让两激光器输出到对方的激光分别在相位调制控制下,可实现混沌同步或者非同步,并最终实现全光同或逻辑门的功能与计算.这个技术方法就是利用激光混沌键控编码方法加上激光外部调制方法的组合改进方案.其中,光的外部调制广泛应用于光通信中,该系统方案有利于光器件集成,符合现代集成光学发展潮流.同时,对输出激光进行

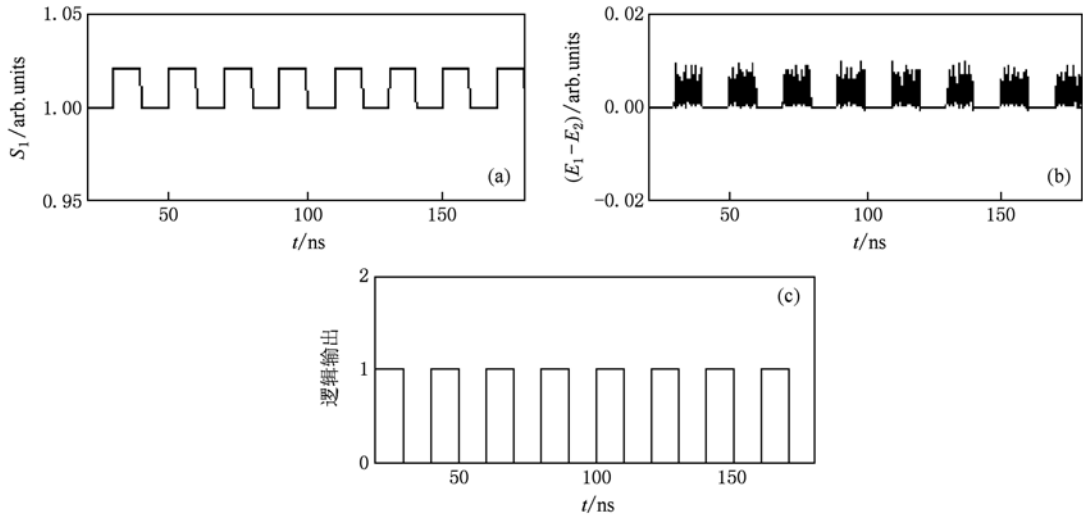


图4 单电流调制 (a) SL<sub>1</sub> 电流调制信号; (b) 同步解调; (c) 逻辑信号输出

外部调制,不会影响激光器工作稳定性,由于耦合反馈作用,两激光器同步会加强,激光器原来的动力特性仍被保持.如设置两副激光器输出到对方的激光分别在相位调制控制下在 0 到  $\pi$  值之间变化.设置 SL<sub>1</sub> 输出到 SL<sub>2</sub> 的激光在相位调制控制以方波函数  $S_1$  在 0 到  $\pi$  值之间变化,该调制方式是 SL<sub>1</sub> 输出到 SL<sub>2</sub> 的激光附加的相位变化形式是  $\varphi_1 = \pi \times S_1$ ;同时设置 SL<sub>2</sub> 输出到 SL<sub>1</sub> 的激光在相位调制控制以方波函数  $S_2$  在 0 到  $\pi$  值之间变化,该调制方式是 SL<sub>2</sub> 输出到 SL<sub>1</sub> 的激光附加的相位变化形式是  $\varphi_2 = \pi \times S_2$ .当  $\varphi_1 = \pi$  以及  $\varphi_2 = \pi$  或者  $\varphi_1 = 0$  以及  $\varphi_2 = 0$ ,即  $\varphi_1 = \varphi_2$  情况下( $S_1 = S_2$ ),激光同步就可以实现.当  $\varphi_1 = 0$  以及  $\varphi_2 = \pi$  或者  $\varphi_1 = \pi$  以及  $\varphi_2 =$

0,即  $\varphi_1 \neq \varphi_2$  情况下( $S_1 \neq S_2$ ).激光同步就不可以实现,此时非同步就可明显观察到.这样通过观测激光同步和非同步,系统就可以进行“同”与“或”的计算.如同步代表“1”,非同步代表“0”,通过两激光器输出激光的同步解调,系统就具有“同”与“或”的逻辑计算功能.在数值计算中,方程(1),(2)还需要改写.其中,(1)式中的第一方程式以及第二方程式的右边第三项分别改写为

$$\frac{k_1}{\tau_L} [E_2 \cos(\phi_2 + \pi \times S_2 - \phi_1 - \pi \times S_1) - E_1],$$

$$\frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\phi_2 + \pi \times S_2 - \phi_1 - \pi \times S_1). \quad (3)$$

(2)式中的第一方程式以及第二方程式的右边第三

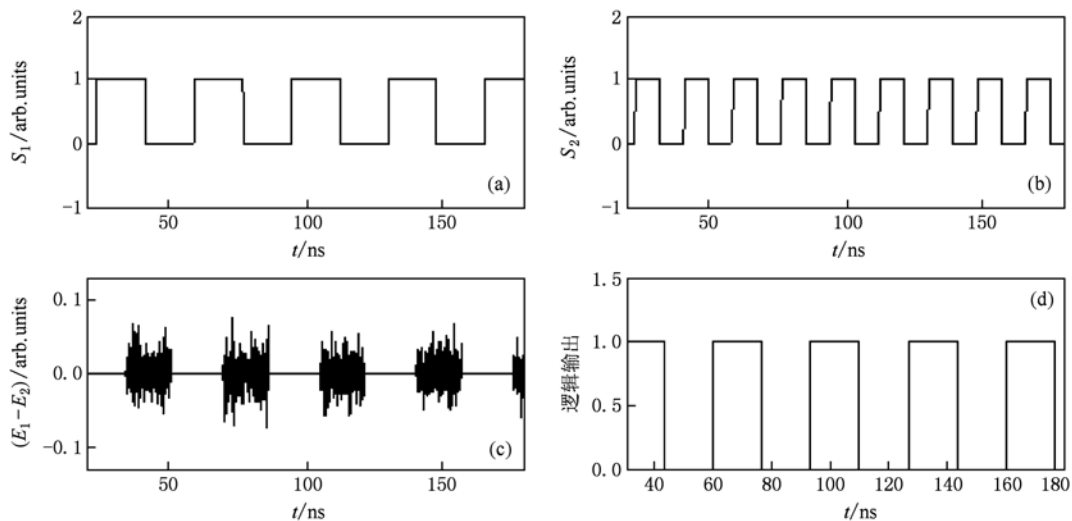


图5 双相位调制

项分别改写为

$$\frac{k_2}{\tau_L} [E_1 \cos(\varphi_1 + \pi \times S_1 - \varphi_2 - \pi \times S_2) - E_2],$$

$$\frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1}{E_{21}} \sin(\varphi_1 + \pi \times S_1 - \varphi_2 - \pi \times S_2). \quad (4)$$

利用方程(1),(2)及(3),(4),数值结果如图5所示.其中,(a)是SL<sub>1</sub>输出到SL<sub>2</sub>激光调制信号S<sub>1</sub>形式,(b)是SL<sub>2</sub>输出到SL<sub>1</sub>激光调制信号S<sub>2</sub>形式,(c)是激光混沌同步解调,(d)是通过激光同步与非同步比较后的逻辑信号输出.数值结果证明了该系统在外部光双相位调制下可实现全光同或门计算功能.

#### 4.2. 单相位调制控制下的全光非门

仅对一个激光器输出到对方的光进行相位控制调制,另一个激光器输出到对方的激光不进行相

位调制,也可实现混沌同步或者非同步,并最终实现全光非门的逻辑功能与计算.如设置SL<sub>1</sub>输出到SL<sub>2</sub>的激光在相位调制控制以方波函数S<sub>1</sub>在0到π之间变化,该调制方式是SL<sub>1</sub>输出到SL<sub>2</sub>的激光附加相位变化是φ<sub>1</sub> = π × S<sub>1</sub>;而SL<sub>2</sub>输出到SL<sub>1</sub>的激光不进行调制.在φ<sub>1</sub> = 0情况下,激光同步就可以实现.在φ<sub>1</sub> = π情况下,系统不可能实现激光同步,而非同步可明显观察到.通过观测激光同步和非同步,系统就可进行“非”计算.如同步代表“1”,非同步代表“0”,通过两激光器输出激光的同步解调,系统就具有了“非”的逻辑计算功能.在数值计算中,仅让方程(3),(4)中S<sub>2</sub>取为零参数项.数值结果如图6所示,其中,(a)是SL<sub>1</sub>输出到SL<sub>2</sub>激光调制信号S<sub>1</sub>形式,(b)是激光混沌同步解调,(c)是通过激光同步与非同步比较后的逻辑信号输出.数值结果证明了该系统可进行外部光单相位调制实

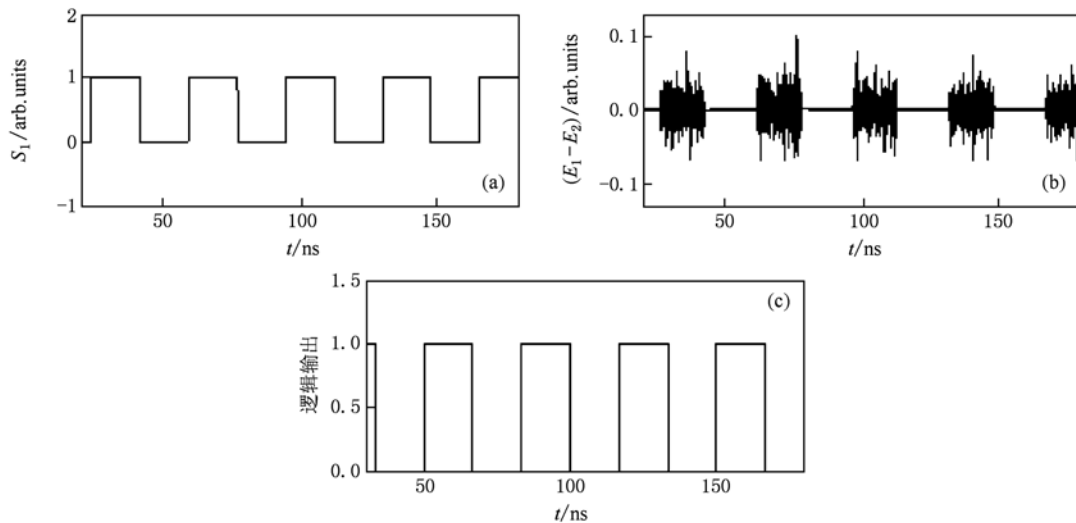


图6 相位调制

现全光非门计算.

### 5. 结 论

关于系统同步误差、噪声影响以及参数失配等问题,我们在相关文献中已有报道<sup>[12-15]</sup>.本文主要提出半导体激光器混沌耦合反馈同步系统实现两种基本的光电及全光逻辑门.如让激光器分别在电

流调制控制下,系统通过观察两激光器混沌同步或者非同步,就可实现光电逻辑门的功能与计算;如让两相互耦合激光在相位调制控制下,实现混沌同步或者非同步,系统可最终实现全光逻辑门的功能与计算.数值结果证明了该系统具有可行性.该系统提出了半导体激光混沌在光学逻辑门应用中的新方案,对光学逻辑计算与设计具有一定的参考价值.

- [1] Annovazzi-Lodi V, Donati S, Scirè A 1996 *J. IEEE Quantum Electronics* **32** 953
- [2] 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]
- [3] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2819 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 2819]
- [4] 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]
- [5] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, Wang B J, Li Y L, Guo P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4372 (in Chinese) [王云才、张耕玮、王安帮、王冰洁、李艳丽、郭萍 2007 物理学报 **56** 4372]
- [6] Kong L Q, Wang A B, Wang H H, Wang Y C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2266 (in Chinese) [孔令琴、王安帮、王海红、王云才 2008 物理学报 **57** 2266]
- [7] Yan S L 2007 *Chin. Phys.* **16** 3271
- [8] Wu L, Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [9] Sinha S, Ditto W L 1998 *J. Phys. Rev. Lett.* **81** 2156
- [10] Murali, Sinha S, Ditto W L 2003 *Int. J. Bifurcation Chaos Appl. Sci. Eng.* **13** 2669
- [11] Chlouverakis K E, Adams M J 2005 *Electronics Letters* **41** 359
- [12] Yan S L 2002 *Acta Electron. Sin.* **30** 1663 (in Chinese) [颜森林 2002 电子学报 **30** 1663]
- [13] Yan S L 2005 *Acta Electron. Sin.* **33** 226 (in Chinese) [颜森林 2005 电子学报 **33** 226]
- [14] Yan S L 2005 *Chin. J. of Lasers.* **32** 1503 (in Chinese) [颜森林 2005 中国激光 **32** 1503]
- [15] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6267 (in Chinese) [颜森林 2006 物理学报 **55** 6267]
- [16] Troger J, Nicati P A, Th'evenaz L, Robert Ph A, 1999 *IEEE Quantum Electronics* **35** 1713
- [17] Yan S L 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 996 (in Chinese) [颜森林 2009 光学学报 **29** 996]
- [18] Chen H F, Lin J M 2000 *IEEE J. Quantum Electronics* **36** 27
- [19] Kanakidis D, Argyris A, Syvridis D 2003 *J. Lightwave Technology* **21** 750
- [20] Yan S L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1098 (in Chinese) [颜森林 2005 物理学报 **54** 1098]
- [21] Annovazzi-Lodi V, Benedetti M, Merlo S, Perez, T Colet P, Mirasso C R 2007 *IEEE Photonic Technology Letters* **19** 76
- [22] Jin J X, Qiu S S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 792 (in Chinese) [晋建秀、丘水生 2010 物理学报 **59** 792]
- [23] Zhang C X, Yu S M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3017 (in Chinese) [张朝霞、禹思敏 2010 物理学报 **59** 3017]

## Optoelectronic or all-optical logic gates using chaotic semiconductor lasers using mutual coupling-feedback

Yan Sen-Lin <sup>†</sup>

(Department of Physics and Electronic Engineering, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 211171, China)

(Received 1 August 2010; revised manuscript received 23 August 2010)

### Abstract

We present theoretically the construction of the fundamental gates using two injection semiconductor laser diodes by means of mutual coupling-feedback. Two laser diodes driven by a common monochromatic light beam run chaos while chaotic synchronization between the two lasers is achieved by coupling-feedback. The optoelectronic logic gate is implemented by appropriately synchronizing or de-synchronizing the two chaotic states by modulating the currents. The all-optical logic gate is finally implemented by appropriately synchronizing or de-synchronizing the two chaotic states via the modulators modulating the coupling lights, which is an external optical modulation method. Numerical results validated the feasibility of the method.

**Keywords:** chaos, logic gate, laser, synchronization

**PACS:** 05.45.Gg, 05.45.Pq, 42.65.Sf, 42.55.Px

<sup>†</sup> E-mail: yansenlinsh@sina.com