

全光 XNOR、NOR、NOT 及组合光电 NOR 激光混沌耦合同步系统逻辑门研究

颜森林

(南京晓庄学院物理与电子工程学院, 江苏 南京 211171)

摘要 研究了半导体激光器混沌耦合同步及其在光学逻辑门的应用。利用两个混沌半导体激光器的耦合, 构建了基本全光及组合光电逻辑门的理论模型及计算原理。一是利用光的外部调制方法进行两相互耦合激光的调制, 控制激光混沌同步或者非同步, 实现全光逻辑门的功能与计算; 二是既进行外部光调制, 也进行激光器的电流调制, 在光和电流同时联合调制控制下, 使系统出现混沌同步或者非同步, 实现组合光电逻辑门的功能与计算。具体提出了全光 XNOR、NOR、NOT、组合光电 NOR 逻辑门及逻辑计算方法, 数值模拟结果证明了系统方案的可行性。

关键词 光计算; 混沌; 逻辑门; 半导体激光器; 同步

中图分类号 O415.5; TP302.2; TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100412

All-Optical XNOR, NOR, NOT Logic Gates and Combinatorial Optoelectronic Logic Gate Using Chaotic Synchronization of Coupling Lasers

Yan Senlin

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

Abstract Chaotic synchronization of semiconductor lasers with the coupling and its application in optical logic gates are studied. The constructions of the fundamental all-optical and optoelectronic logic gates using two chaotic lasers due to the mutual coupling and their computational principle are presented theoretically. All-optical logic gates are finally performed by synchronizing or unsynchronizing appropriately the two chaotic states via modulating the coupling light. And the optoelectronic logic gate is implemented by synchronizing or unsynchronizing appropriately the two chaotic states via modulating the current and coupling light together. All-optical XNOR, NOR, NOT, optoelectronic logic gates and their logic computational methods are presented. Numerical simulative results validate the feasibility of the system.

Key words optics in computing; chaos; logic gate; semiconductor laser; synchronization

OCIS codes 140.1540; 200.4660; 140.5960; 190.3100

1 引 言

近十几年来, 激光混沌及其应用受到了广泛的研究^[1~4]。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, 非常适合于高速远程保密通信、激光测量以及激光雷达等应用^[5~7]。目前, 混沌及其在计算领域的新应用研究也受到了高度重视^[8~10]。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逻辑门, 那么系统就具有多个函数功能的逻辑计算能力。因此, 混沌及其在逻辑门应用的研究具有重要的意义^[4,8~10]。文献[4]提出了双区激光器混沌双电流

收稿日期: 2011-01-25; 收到修改稿日期: 2011-03-14

作者简介: 颜森林(1962—), 男, 博士, 教授, 目前主要从事光通信、激光器及非线性光学方面的研究。

E-mail: senlinyan@163.com

调制或非逻辑门。激光混沌及其在光学逻辑计算中的应用还要做进一步深入研究。

本文基于文献[4]的方案,再利用全光调制方法,进一步提出几个半导体激光器激光混沌全光以及组合光电逻辑门新方案。其中全光逻辑门有利于光器件集成,组合光电逻辑门则丰富了光电组合逻辑门的应用,其结果对激光混沌保密通信分组交换以及全光逻辑包头识别处理等功能是有益的。

2 物理模型

外部光注入半导体激光器在理论和实验上得到了广泛研究,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^[11]。这里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,通过耦合相互作用,两激光器能够保持同步,类似的系统在理论和实验中都被广泛的研究过^[4,12~14]。图1显示出半导体激光器激光混沌耦合全光及光电逻辑门模块组合,其中,ML是主激光

器,SL₁和SL₂是副激光器,C_M,C₁和C₂是光耦合器,OM₁和OM₂是光调制器,OM₁和OM₂是光调制器,IO是光隔离器,L₁和L₂表示耦合光路,E_m表示注入光,E₁和E₂表示输出光,这是一个背-背的系统且两子系统具有对称性。

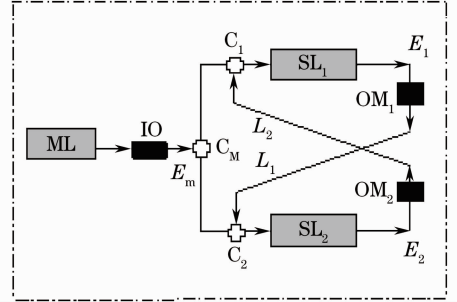


图1 全光及光电逻辑门模块

Fig.1 Module of all-optical and optoelectronic gates

让光调制器对二激光器输送到对方激光器的光分别进行光调制时,该系统可进行全光逻辑门的计算;与此同时,如再对激光器进行电流调制时,该系统则可进行联合光电逻辑门的计算。两副激光器动力学行为可用下列方程组描述^[12~14]:

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{K}{\tau_L}E_m \cos \phi_1 + \frac{k_1}{\tau_L}E_2 \cos(\phi_2 - \phi_1), \\ \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_m}{E_1} \sin(-\phi_1) + \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\phi_2 - \phi_1) - \Delta\omega, \\ \frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{K}{\tau_L}E_m \cos \phi_2 + \frac{k_2}{\tau_L}E_1 \cos(\phi_1 - \phi_2), \\ \frac{d\phi_2}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L}E_m \sin(-\phi_2) + \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\phi_1 - \phi_2) - \Delta\omega, \\ \frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - GV_pE_2^2, \end{cases} \quad (2)$$

式中角标“1”和“2”代表两个激光器。 E 是激光场慢变部分, N 是激光器载流子数。 β_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, α_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 是光耦合系数。数值模拟时激光器参量取自文献[11],其它参量取 $\Delta\omega = 2\pi \times 10^9$ rad/s, $E_m = 0.125E_s$, $K = 0.03$, $k = 0.0091$ 。如让 $I_1 = I_2 = I$, $k_1 = k_2 = k$ 时,图2是系统的激光混沌同步的取得。该系统可作为逻辑门组织单元基础。这里一是利用混沌键控编码方法和光的外部调制方法^[12~14],对两相互耦合激光进行调制实现混沌同步或者非同步,实现全光逻辑门的功能与计算。二是同时进行光的外部调制和激

光器的电流调制,使系统产生混沌同步或者非同步,实现光电逻辑门的功能与计算。

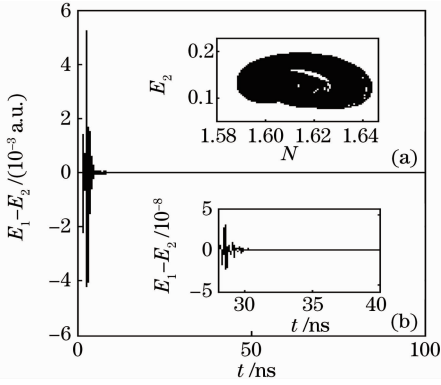


图2 系统取得同步。(a)激光混沌吸引子；
(b)同步差的放大

Fig. 2 Chaotic synchronization achieved. (a) Chaotic attractor; (b) zoomed synchronization

3 全光逻辑门

当对两激光器输送到对方的激光进行调制控制时,实现混沌同步或者非同步,系统就可实现全光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再加上激光外部调制方法的组合改进方案^[11-14]。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。

3.1 相位调制控制下的全光同或门

全光或非门已经得到实现^[15],进一步对两副激光器输送到对方的激光进行相位调制控制可实现全光同或门。新方案是:让 SL_1 输送到 SL_2 的激光在相位调制控制下在 0 到 $\pi/3$ 之间变化,即 SL_1 输出到 SL_2 的激光附加的相位变化形式是 $\varphi_1 = S_1 \times$

$\pi/3$,其中 S_1 是逻辑输入信号;同时设置 SL_2 输出到 SL_1 的激光在相位调制控制在 0 到 π 之间变化,即 SL_2 输送到 SL_1 的激光附加的相位变化形式是 $\varphi_2 = \pi S_2$,其中 S_2 是逻辑输入信号。逻辑计算方法是,当 $(S_1, S_2) = (0, 0)$ 时,即 $\varphi_1 = \varphi_2$,激光同步可实现,此时非同步可明显观察到。当 $(S_1, S_2) \neq (0, 0)$ 时,即 $\varphi_1 \neq \varphi_2$,激光同步就不可实现,此时非同步可明显观察到。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,(1)式还需改写,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

$$\begin{cases} \frac{k_1}{\tau_L} E_2 \cos(\phi_2 + \pi \times S_2 - \phi_1 - S_1 \times \pi/3), \\ \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\phi_2 + \pi \times S_2 - \phi_1 - S_1 \times \pi/3). \end{cases} \quad (3)$$

(2)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

$$\begin{cases} \frac{k_2}{\tau_L} E_1 \cos(\phi_1 + S_1 \times \pi/3 - \phi_2 - \pi S_2), \\ \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\phi_1 + S_1 \times \pi/3 - \phi_2 - \pi S_2). \end{cases} \quad (4)$$

利用上式所得的数值结果如图3所示。其中,图3(a)是 SL_1 输送到 SL_2 激光的调制信号 S_1 形式,图3(b)是 SL_2 输送到 SL_1 激光调制信号 S_2 形式,图3(c)是激光混沌同步解调,其中 $E_1 - E_2$ 是同步差。图3(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的计算功能。

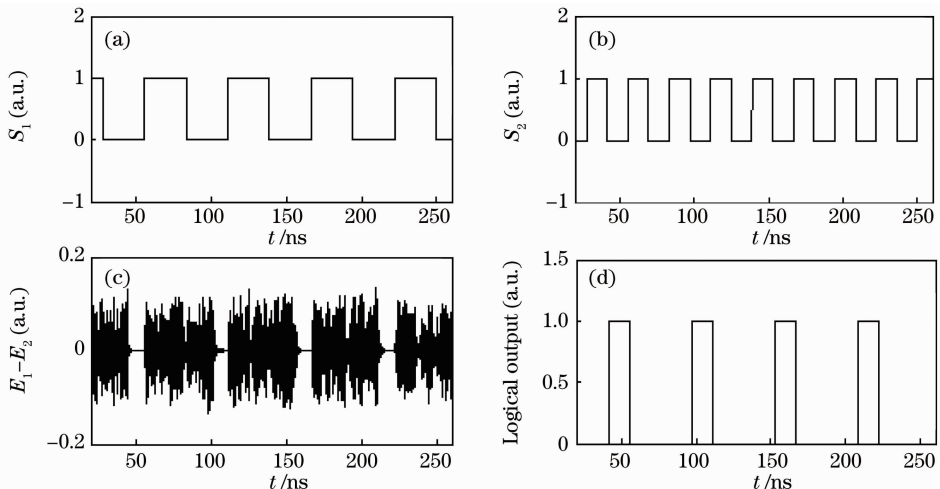


图3 全光 NOR 门操作

Fig. 3 Simulation realization of the all-optical NOR logic gate

3.2 振幅调制控制下的全光或非门

如进一步对两副激光器输送到对方的激光进行等振幅调制控制,就可实现振幅调制控制下的全光或非逻辑门功能与计算。如进行加法调制, S_1 和 S_2 分表示激光器 1 和 2 的逻辑输入信号, ΔA 是调制深度且计算中取 $\Delta A = 1.5\%$ 。逻辑计算方法是,当 $S_1 = S_2$ 时,即 $(S_1, S_2) = (0, 0)$, 或者 $(S_1, S_2) = (1, 1)$ 情况下,激光同步可实现。当 $S_1 \neq S_2$ 时,即 $(S_1, S_2) = (1, 0)$, 或者 $(S_1, S_2) = (0, 1)$, 激光同步就不可实现。通过观测激光同步和非同步,系统就可进行“或”与“非”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“或”与“非”的逻辑计算功能。在数值计算中,对(1)式进行改写。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

$$\begin{cases} \frac{k_1}{\tau_L} E_2 (1 + \Delta A \times S_2) \cos(\phi_2 - \phi_1), \\ \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2 (1 + \Delta A \times S_2)}{E_1} \sin(\phi_2 - \phi_1). \end{cases} \quad (5)$$

(2)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

$$\begin{cases} \frac{k_2}{\tau_L} E_1 (1 + \Delta A \times S_1) \cos(\phi_1 - \phi_2), \\ \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1 (1 + \Delta A \times S_1)}{E_2} \sin(\phi_1 - \phi_2). \end{cases} \quad (6)$$

利用上式数值结果如图 4 所示。其中,图 4(a)是 SL_1 输送到 SL_2 激光调制信号 S_1 形式,图 4(b)是 SL_2 输送到 SL_1 激光调制信号 S_2 形式,图 4(c)是激光混沌同步解调,图 4(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等振幅调制下可实现全光或非门的逻辑计算功能。

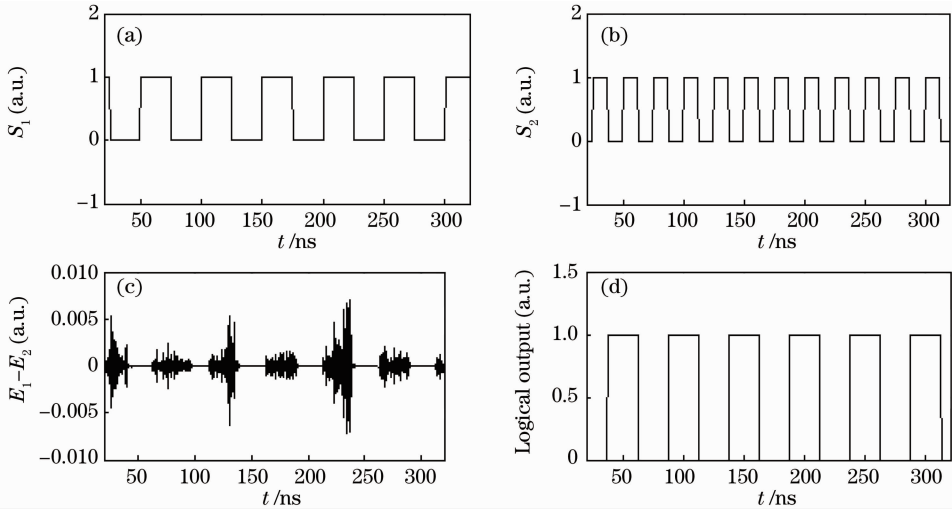


图 4 全光 XNOR 门操作

Fig. 4 Simulation realization of the all-optical XNOR logic gate

3.3 振幅调制控制下的全光非门

如仅对一个激光器输出到对方的光进行振幅调制控制,实现混沌同步或者非同步,系统就具有全光非逻辑门的计算功能。如设置 SL_2 输出到 SL_1 的激光进行振幅调制控制。设 S_2 是逻辑输入信号。当 $S_2 = 0$ 时,激光同步可实现。当 $S_2 = 1$ 时,激光同步不可实现。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(5)式中的项 S_1 取为零参数值。利用(1),(2),(5),(6)式,计算结果如图 5 所示,其中,图 5(a)是 SL_1 输送到 SL_2 激光调制信号 S_1 形式,图 5(b)是激光混沌同步解调,图 5(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调制全光非门的逻辑计算。

4 组合光电逻辑门

同时对激光器电流调制和耦合光调制控制,利用混沌同步或者非同步,去实现组合光电逻辑门。这个技术方案是激光混沌键控编码方法和光的外部调制方法的组合改进。如设置 SL_2 驱动电流强度在值 I 到 $(1 + \Delta m)I$ 之间变化,即电流调制方式是 $I(1 + \Delta m \times S_1)$,其中 S_1 是逻辑输入信号,数值计算中取: $\Delta m = 0.7\%$ 。与此同时也对 SL_2 输入到 SL_1 激光进行振幅调制,设 S_2 是逻辑输入信号。在具体数值计算中,利用(1),(2),(5),(6)式,其中,让(6)式

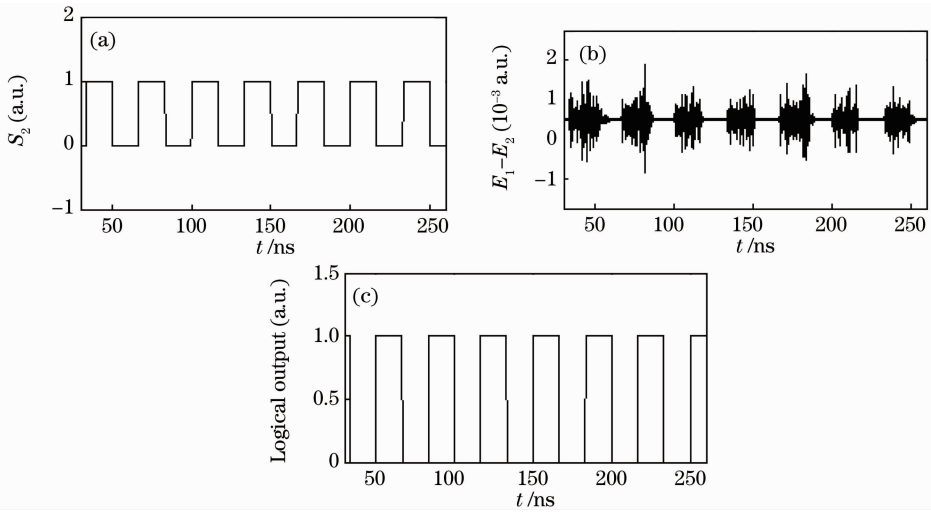


图 5 全光 NOR 门操作

Fig. 5 Simulation realization of the all-optical NOR logic gate

中的项 S_1 取零参数值, (1)式中的电流项取值 $I_1 = I$, 而(6)式中的电流项取 $I_2 = I(1 + \Delta m \times S_1)$ 。逻辑计算方法是: 当 $(S_1, S_2) = (0, 0)$ 时, 即 $I_1 = I$ 以及 $E_1 = E_2$, 激光同步就能实现。当 $(S_1, S_2) \neq (0, 0)$ 时, 即 $(S_1, S_2) = (1, 1)$, 或者 $(S_1, S_2) = (1, 0)$, 或者 $(S_1, S_2) = (0, 1)$, 系统呈现激光非同步。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“同”与“或”的逻辑计算功能。数值结果如图 6 所示, 其中, 图 6(a)是 SL_2 电流调制信号 S_1 形式, 图 6(b)是 SL_2 光调制信号 S_2 形式, 图 6(c)是混沌同步解调, 图 6(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光与电的联合调制实现光电同或逻辑门的功能与计算。

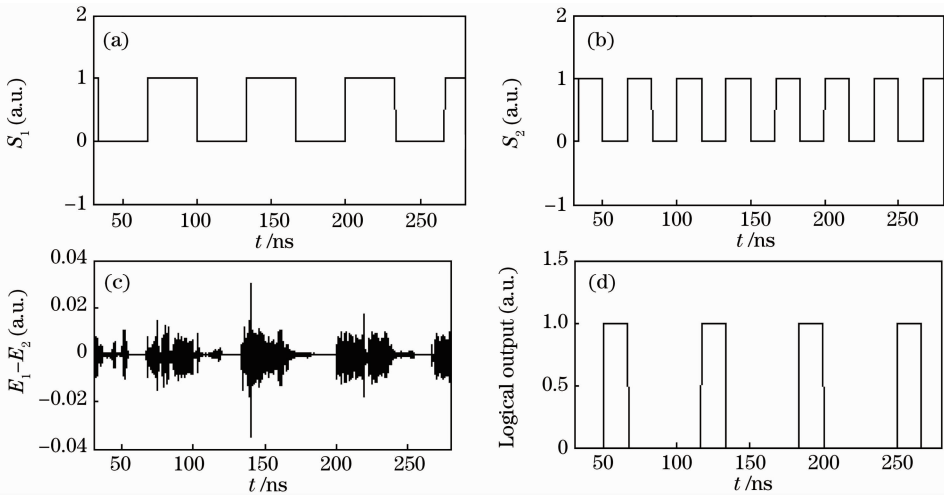


图 6 组合光电 NOR 门操作

Fig. 6 Simulation realization of the combination optoelectronic NOR logic gate

5 结 论

本文主要提出半导体激光器混沌耦合同步系统如何去实现多个基本全光及联合光电逻辑门的新方法。当对两相互耦合激光进行调制控制时, 系统能够实现全光逻辑门的功能与计算; 当对激光器进行联合光与电的调制时, 系统能够实现光电逻辑门的功能与计算。系统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。

参 考 文 献

1 V. Annovazzi-Lodi, S. Donati, A. Scirè. Synchronization of chaotic injected laser systems and its application to optical cryptography[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 1996, **32**(6):

953~959

- 2 S. Sinha, W. L. Ditto. Dynamics based computation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(10): 2156~2159
- 3 K. Murali, S. Sinha, W. L. Ditto. Implementation of NOR gate by a chaotic Chua's circuit[J]. *Int. J. Bifurcation Chaos Appl. Sci. Engng.*, 2003, **13**(9): 2669~2972
- 4 K. E. Chlouverakis, M. J. Adams. Optoelectronic realization of NOR logic gate using chaotic two-section lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(6): 359~360
- 5 S. L. Yan. Study of dual-directional high rate secure communication systems using chaotic multiple-quantum-well lasers[J]. *Chin. Phys.*, 2007, **16**(11): 3271~3278
- 6 L. Wu, S. Q. Zhu. Communications using multi-mode laser system based chaotic synchronization[J]. *Chin. Phys.*, 2003, **12**(3): 300~304
- 7 H. F. Chen, J. M. Lin. Open-loop chaotic synchronization of injection-locking semiconductor lasers with gigahertz range modulation[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 2000, **36**(1): 27~34
- 8 T. Munakata, S. Sinha, W. L. Ditto. Chaos computing; implementation of fundamental logical gates by chaotic elements [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems- I*, 2002, **49**(11): 1629~1633
- 9 K. Murali, S. Sinha, W. L. Ditto. Realization of the fundamental NOR gate using a chaotic circuit[J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **68**(3): 016205
- 10 S. Sinha, T. Munakata, W. L. Ditto. Flexible parallel implementation of logic gates using chaotic elements[J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(3): 036216
- 11 J. Troger, P.-A. Nicati, L. Th'evenaz *et al.*. Robert. Novel measurement scheme for injection locking experiments[J]. *IEEE Quant. Electron.*, 1999, **35**(1): 1713~1717
- 12 D. Kanakidis, A. Argyris, D. Syvridis. Performance characterization of high-bit-rate optical chaotic communication systems in a back-to-back configuration [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(3): 750~758
- 13 S. L. Yan. Envelope masking and phase encoding via external modulation and their applications to optical fiber secure communications[J]. *Electronics & Information Technology*, 2008, **30**(7): 1591~1593
- 14 V. Annovazzi-Lodi, M. Benedetti, S. Merlo *et al.*. Message encryption by phase modulation of a chaotic optical carrier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(2): 76~78
- 15 Senlin Yan. All-optical realization of XNOR logic gate using chaotic semiconductor lasers under the phase modulator control [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(12): 1147~1149