

激光混沌并联同步及其在全光逻辑门中的应用研究

颜森林[†]

(南京晓庄学院物理与电子工程学院, 南京 211171)

(2013年7月20日收到; 2013年8月23日收到修改稿)

提出多量子阱激光器混沌“主-从-响应”式结构同步系统, 研究其并联同步在光学逻辑门中的应用. 利用一个注入多量子阱激光器混沌系统注入驱动实现了两个响应多量子阱激光系统的混沌并联同步, 同时还获得了“主-从”式结构的混沌同步. 基于响应子系统的混沌并联同步思想, 提出了全光逻辑门的基本理论模型并定义了计算原则与方法. 利用光的外部调制方法对两个驱动光进行调制与控制, 让两个响应子系统实现同步与非同步, 使系统获得了并具有全光逻辑门函数功能与特点, 并成功地进行了数字逻辑计算. 具体提出了全光 XNOR、NOR、NOT 等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: 混沌, 同步, 逻辑门, 多量子激光器

PACS: 05.45.Gg, 42.55.Px, 42.65.Sf, 02.10.Ab

DOI: 10.7498/aps.62.230504

1 引言

上世纪 90 年代初, 混沌控制与混沌同步的理论都取得了巨大进步^[1,2], 其中混沌同步及其应用研究的成果越来越丰富^[3-6]. 近十几年, 人们对激光混沌研究越来越重视, 研究发现激光混沌的带宽有可能达几十个 GHz, 而且信号衰减较低, 特别是具有极高的对参数敏感特性等. 可见, 激光混沌较适合应用在光通信、激光测距及雷达等方面^[3-8]. 当前, 人们又开始高度重视混沌在计算领域的应用研究^[9-11]. 研究中发现假如在两混沌系统之间能实现同步与非同步, 那么就能仿真基本的逻辑运算, 能进行基本的数学计算. 如果混沌系统具有这方面的能力, 这就意味它具有基本的数学逻辑计算功能. 所以, 混沌同步在逻辑门中应用研究具有重要意义^[9-14]. 目前报道有关混沌激光逻辑门有, 耦合注入双区半导体激光器混沌逻辑门, 空间耦合激光混沌逻辑门, 耦合-反馈激光混沌逻辑门等^[10-14]. 目前, 大部分对半导体激光器混沌同步的研究主要集中在两个或多个激光器串联的主从式结构^[3-7]. 它们主要应用在混沌同步保密通信中. 而对一个激光器的混沌输出同时驱动两个或多个并联激

光器的并联混沌同步以及它们应用研究还比较缺乏^[15-19]. 激光混沌同步特别是激光并联混沌同步及其在光学逻辑计算中的应用还要做进一步深入研究.

在本文中, 提出一个注入多量子阱激光器 (MQW L) 混沌系统注入驱动两个响应多量子阱激光器混沌系统“主-从-响应”式同步方案; 基于其中的并联同步, 再利用全光调制方法, 进一步构成几个激光混沌全光逻辑门新技术方案. 由于全光逻辑门有利于光器件集成, 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. 同时也为激光并联混沌同步在光学逻辑计算中的应用提供了新的技术手段.

2 同步

“主-从-响应”同步系统模块组合如图 1 所示, 其结构是“T”驱动系统 (图左边所示) 和“1”和“2”并联响应系统构成 (图右边所示, 类似地可并联多个), 各系统由主 (M)、副 (S) MQW L 组成. 为了同步, 二个响应系统各有一个反馈回路. 驱动系统中 M-L 的激光注入可以使 S-L 激光趋向混沌态. 驱动系统发射混沌激光驱动二个响应系统, 在驱

[†] 通讯作者. E-mail: yansenlinbsh@sina.com

动信号作用下,二个响应系统将逐步趋于同步.驱动系统 S-LD 激光器动力学行为由下面方程组来描述^[13-20]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_I}{dt} &= \frac{1}{2}(G_I - \gamma)E_I + \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(-\varphi_I), \\ \frac{d\varphi_I}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_I - \gamma) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_I} \sin(-\varphi_I) - \Delta\omega, \quad (1) \\ \frac{dN_{BI}}{dt} &= \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQ}N_{BI} + \gamma_{QB}N_I, \\ \frac{dN_I}{dt} &= \gamma_{BQ}N_{BI} - (\gamma_{er} + \gamma_{QB})N_I - G_{I,r}V_p E_I^2. \quad (2) \end{aligned}$$

二个响应系统 S-LD 激光器动力学行为由下面方程组来描述^[4-6]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{1,2} - \gamma)E_{1,2} + \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(-\varphi_{1,2}) \\ &\quad + \frac{f}{\tau_L}[(E_I + S_{1,2})\cos(\varphi_I - \varphi_{1,2}) - E_{1,2}] \\ \frac{d\varphi_{1,2}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{1,2} - \gamma) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{1,2}} \sin(-\varphi_{1,2}) \\ &\quad + \frac{f}{\tau_L} \frac{(E_I + S_{1,2})}{E_{1,2}} \sin(\varphi_I - \varphi_{1,2}) - \Delta\omega, \quad (3) \\ \frac{dN_{B1,2}}{dt} &= \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQ}N_{B1,2} + \gamma_{QB}N_{1,2}, \\ \frac{dN_{1,2}}{dt} &= \gamma_{BQ}N_{B1,2} - (\gamma_{e1,2} + \gamma_{QB})N_{1,2} \\ &\quad - G_{1,2}V_p E_{1,2}^2, \quad (4) \end{aligned}$$

其中,脚标 I 和 1 与 2 分别表示驱动系统 S-LD 和二个回答系统 S-L. E 表示激光振幅, φ 表示激光场相位, N_B 和 N 分别表示激光器势垒层和势阱层中的载流子数. E_m 是主激光器输出激光强度. $\Delta\omega$ 是主激光器和副激光器的激光频率失谐. k 表示光

注入水平因子. f 是驱动-响应系数. S 是调制控制信号或者是逻辑输入信号. 该项是为了进行逻辑计算而特别加入的,变化形式由调制控制器的逻辑函数或者逻辑信号决定. 其他参量函数形式是 $\gamma = \nu_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 表示光子损耗速率; $\tau_L = 2n_g L/c$ 表示光在腔中来回时间; $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 表示载流子损耗速率;

$G = [(\Gamma g_0 \nu_g)/(1 + E^2/E_s^2)] \lg\{(N + N_s)/(N_0 + N_s)\}$ 表示模式增益,其中 $\Gamma = V/V_p$ 是限制因子, $N_s = n_s V$ 是光子饱和时的载流子数, $N_0 = n_0 V$ 是激光取得透明时载流子数;其中上面出现的参数与参量说明见表 1. 其他归一化参数与参量是 $E_m = 0.2529$, $f = 0.2$, $k = 0.3$. 图 2 是三个激光器独立工作时激光混沌波形. 对于系统 (1) 和 (2),其中不仅系统“1”和“2”能够实现并联同步,而且驱动系统“1”和响应系统“1”和“2”也能分别实现主从式结构同步,即驱动系统“1”和响应系统“1”或者“2”成发射和接收同步. 数值结果如图 3 所示. 如设计出二个以上数量的响应系统,还可构成多个主从式结构同步,并可以进行多个广播式发射和接收同步. 总体而言,这个大系统构成了“主-从-响应”结构同步系统. 当然,这篇文章主要关心响应子系统的并联同步及逻辑计算问题. 即利用系统具有并联同步物理特征去设计构造逻辑门并进行数字逻辑计算. 在逻辑操作与光计算中,用二个光调制器分别调制驱动激光的逻辑输入信号,控制响应系统的并联同步或者非同步,实现逻辑判断与计算. 为了进一步看清并联同步的过程,我们给出图 4 以说明同步存在一个振荡过程,同步约在 5 ns 后可实现.

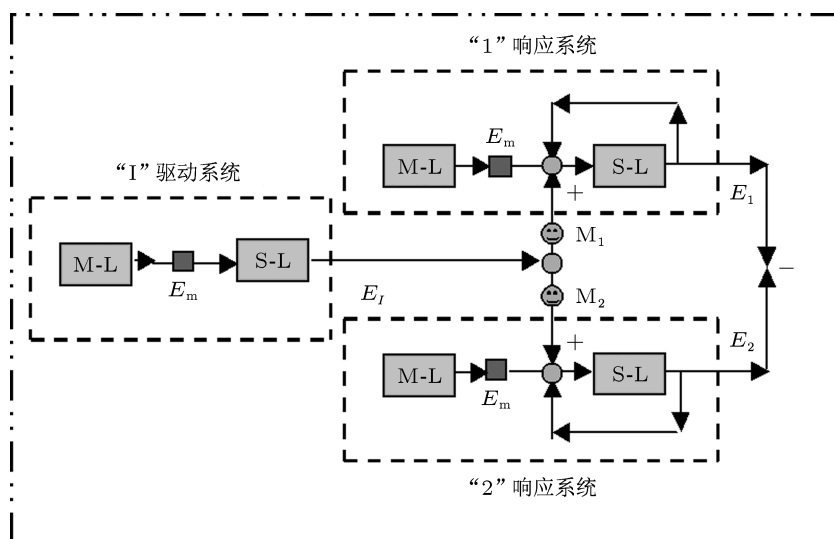


图 1 同步系统模块. 其中, □ 是光隔离器, ○ 是光耦合器, M_1 和 M_2 是光调制器

表 1 激光器参量

腔长 $L/\mu\text{m}$	1200	非辐射复合速率 A_{nr}/s^{-1}	$2.5 \cdot 10^8$
有源层宽度 $w/\mu\text{m}$	1.5	辐射复合因子 $B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	10^{10}
有源层厚度 $d/\mu\text{m}$	0.028	俄歇复合因子 $C/\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$	$5.0 \cdot 10^{-29}$
压缩和限制因子 Γ	0.045	线宽增强因子 β_c	3
群速度折射率 n_g	3.6	驱动电流 I/mA	50
腔内光子损耗 α_m/cm^{-1}	11.5	量子效率 η_i	0.8
腔面光子损耗 $\alpha_{im}/\text{cm}^{-1}$	20	饱和光子数 P_s	$2.2 \cdot 10^7$
线性增益常数 g_0/cm^{-1}	2700	有源势阱层到势垒层速率 $\gamma_{BQ}/\text{s}^{-1}$	$2.5 \cdot 10^{10}$
饱和时的载流子数密度 n_s/cm^{-3}	$0.1 \cdot 10^{18}$	势垒层到有源势阱层速率 $\gamma_{BQ}/\text{s}^{-1}$	$5.0 \cdot 10^9$
透明时的载流子数密度 n_0/cm^{-3}	$2.1 \cdot 10^{18}$	饱和激光振幅 E_s	$(P_s/V_p)^{1/2}$

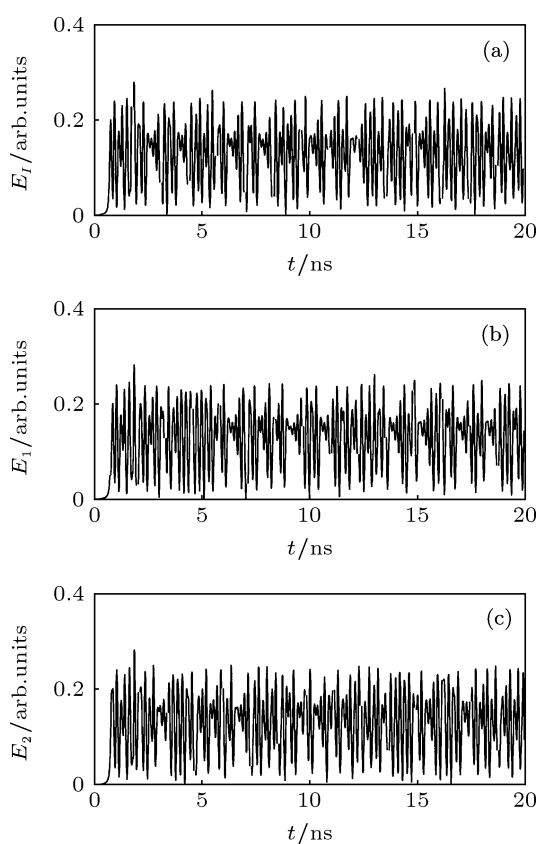


图 2 典型的混沌波形变化 (a) “ Γ ” 系统; (b) “1” 系统; (c) “2” 系统

3 全光非门

如对输出到响应系统 1 的驱动激光实现振幅调制, 控制子系统 1 和 2 实现并联同步或者非同步, 系统就具有全光非门的逻辑函数功能. 如对输出到 SL 1 的驱动激光进行振幅调制控制. 设 S_1 是逻辑输入信号. 当 $S_1 = 0$ 时, 激光 1 和 2 并联同步可实现. 当 $S_1 = 1$ 时, 激光同步不可实现. 如同步代表 “1”, 非同步代表 “0”, 系统通过判断两并联激光器输出光的同步与非同步, 就具有了 “非” 的逻辑函数功能. 在数字计算过程中, 仅让方程组 (2) 中的项 S_2

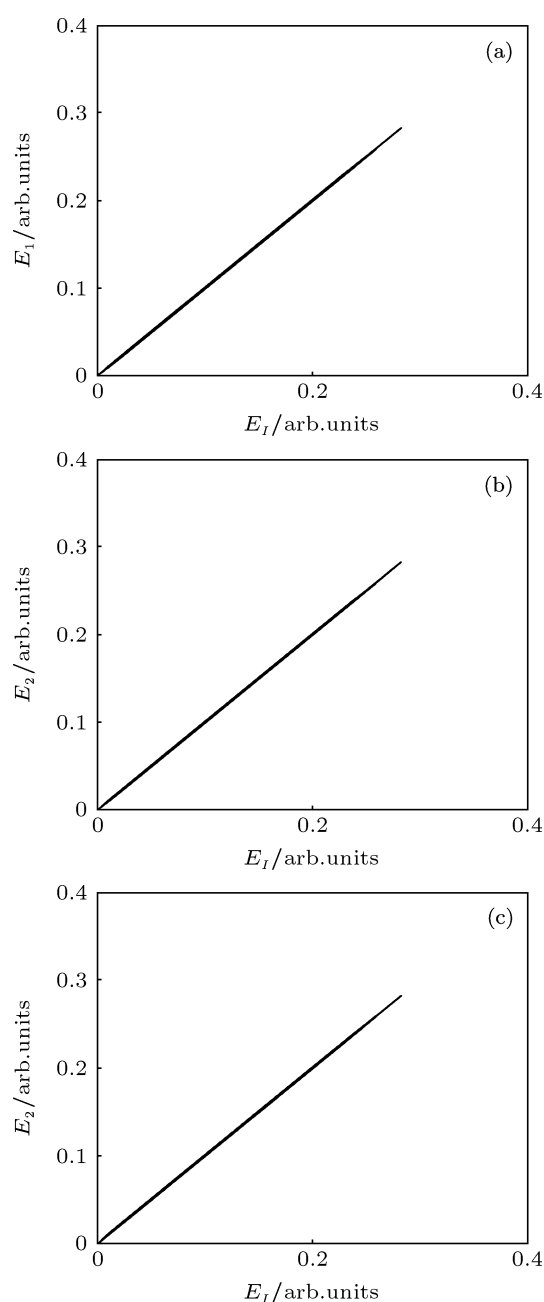


图 3 主从响应同步 (a) “ Γ ” 系统和 “1” 系统同步; (b) “ Γ ” 系统和 “2” 系统同步; (c) “1” 系统和 “2” 系统同步

取为零参数值, S_1 调制幅度取 2%. 利用方程组 (1) 和 (2), 计算结果如图 5 所示, 其中, 图 5(a) 是系统 I 输送到子系统 1 的激光调制信号 S_1 形式, 图 5(b) 是激光混沌系统 1 和 2 的并联同步与非同步的解调过程, 图 5(c) 是系统通过判断同步与非同步后的逻辑信号输出. 上述结果证明系统具有全光非门函数功能以及具有数字逻辑计算能力.

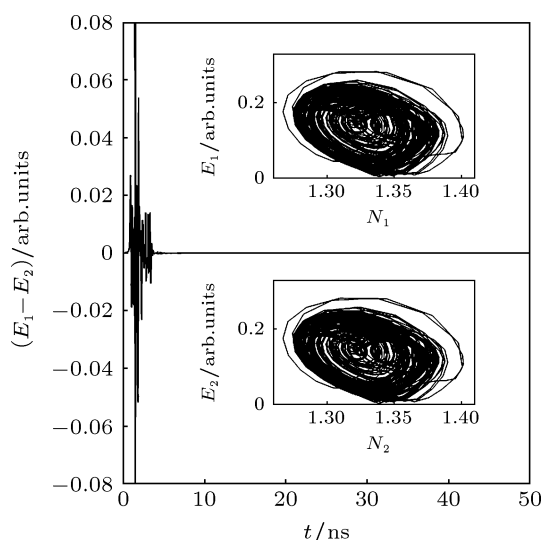


图 4 并联同步 (插入图是同步后二个响应系统的混沌吸引子)

4 全光或非门

如同时对输送到二响应系统的驱动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 S_1 和 S_2 分表示调制器 M_1 和 M_2 的逻辑输入信号, 调制深度都取 1%. 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, 二响应激光系统并联同步可实现. 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. 通过观测二响应系统激光同步与非同步, 系统就可进行“或”与“非”的计算. 如定义同步是“1”, 非同步是“0”, 通过两响应激光系统输出激光的同步解调, 系统就具有“或”与“非”的逻辑计算功能. 图 6 的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函数功能并具有进行或非门的数字逻辑计算能力.

5 全光同或门

这里进一步对输送到二响应系统的驱动激光进行不相等振幅调制控制可实现全光同或门. 技术

方案是: M_1 让 SL I 输送到 SL 1 的激光在振幅调制控制在 0 到 1% 值之间变化, 即 S_1 在 0 到 1% 值之间变化. 同时, M_2 让 SL I 输送到 SL 2 的激光在振幅调制控制在 0 到 1.5% 值之间变化, 即 S_2 在 0 到 1% 值之间变化. 逻辑计算方法是, 当 $(S_1, S_2) = (0, 0)$ 时, 激光并联同步可实现. 当 $(S_1, S_2) \neq (0, 0)$ 时, 即 $S_1 \neq S_2$, SL 1 和 SL 2 两者之间就不可能实现并联同步, 此时非同步可明显观察到. 通过观测或判断 SL 1 和 SL 2 输出的激光同步和非同步, 那么“同”与“或”的数字逻辑计算就可以实现. 如定义同步是“1”, 非同步是“0”, 通过实现 SL 1 和 SL 2 输出的输出激光的混沌同步与非同步的解调, 系统就具有“同”与“或”的数字逻辑函数功能并能实行“同”与“或”的数字光学计算.

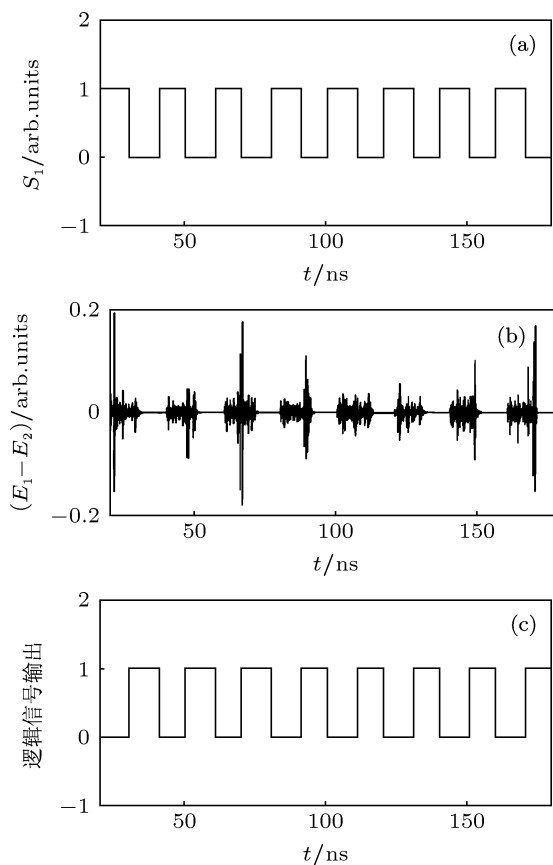


图 5 全光 NOT 门操作

6 逻辑判决时间

图 8 是图 7(c) 的局部放大, 给出了取得并联再同步与非同步的时间. 理论上约在时间 143.95 ns 到 151.51 ns 之间将出现一次同步. 实际操作过程中, 在时间 143.95 ns 后, SL 1 和 SL 2 之间的再同步有一个过程, SL 1 和 SL 2 输出的两个信号差值变

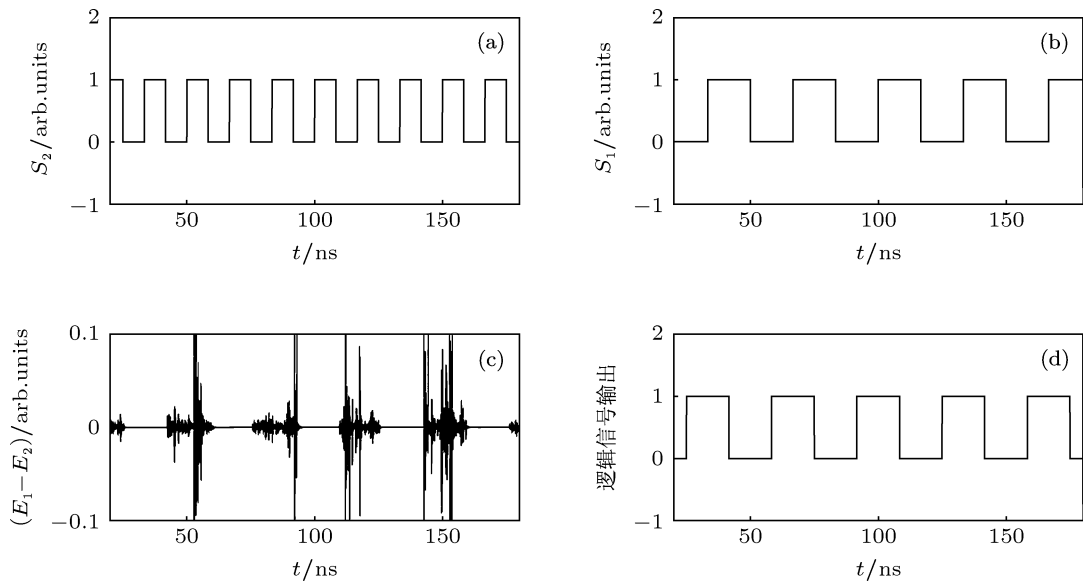


图6 全光 XNOR 门操作

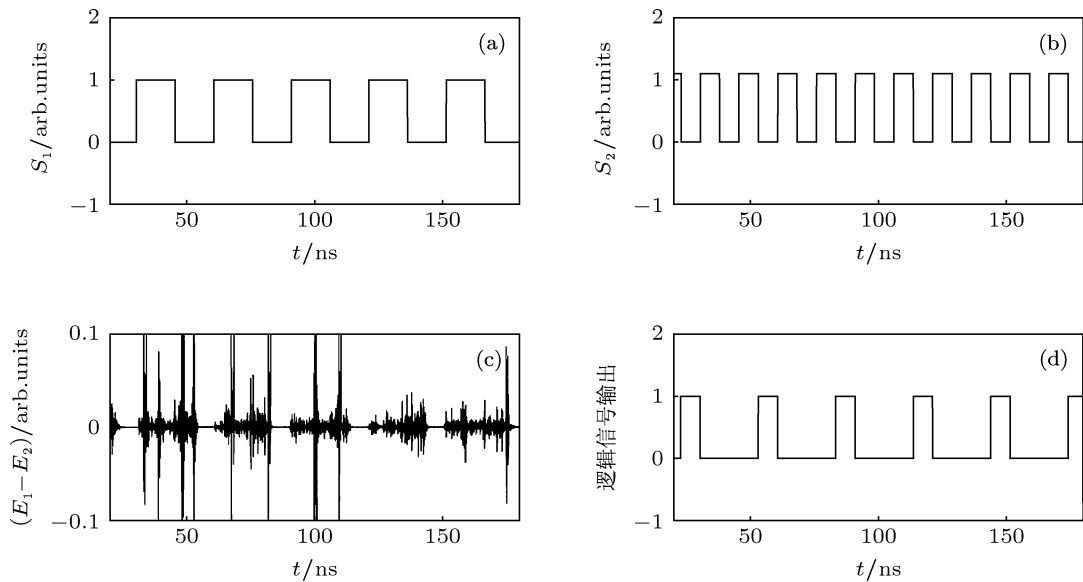


图7 全光 NOR 门操作

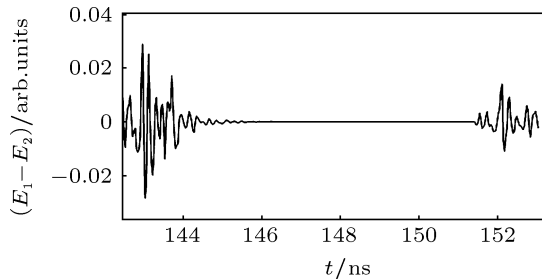


图8 一个再同步与一个非同步的变化过程

化有一个快速衰减振荡过程. 在 144.15 ns, 其两信号同步差是 3.9×10^{-3} ; 在 145.5 ns 时, 同步差是 3×10^{-4} , 同步差下降到 $3 \times 10^{-4} / 3.9 \times 10^{-3} = 7.7\%$; 在 146.26 ns 时, 同步差是 7.8×10^{-5} , 同步差下降

到 $7.8 \times 10^{-5} / 3.9 \times 10^{-3} = 2\%$. 这意味着系统在 2 ns 内, 渐近同步逐步可取得, 同步是可以识别的. 即系统在 2 ns 后就能够完全判断出同步. 而在 151.51 ns 时, 同步差是 -2×10^{-6} , 而当 141.55 ns 时, 同步差是 -1.4×10^{-3} , 同步差变化比例是 $1.4 \times 10^{-3} / 2 \times 10^{-6} = 700$, 即两信号差值变化的振荡幅度在迟延 0.04 ns 后上升了 700 倍, 这预示着 SL 1 与 SL 2 是非同步. 其他逻辑门也具有类似特点. 我们可以适当设定逻辑判决门限的数值, 让所有判决都相应推后 2ns, 这样判决同步与非同步将会立刻获得.

7 结论

关于噪声影响与参数失配等问题, 相关文献中已有研究^[7,8]. 本文主要提出“主-从-响应”结构同步系统, 利用其子系统的并联同步实现了三种基本的全光逻辑门的应用. 如进一步组合多种这样的光学逻辑门, 那么系统就具有复合光学逻辑门功能以及具有多个光学函数的逻辑计算能力. 该基本系统

确实具有全光逻辑门的函数功能特点, 并能进行数字光学逻辑计算. 数值结果证明了该系统具有全光逻辑门可操作性与技术可行性. 该系统方案提出了激光混沌及其并联同步在光学逻辑门应用中的新方法和新技术, 对激光混沌系统应用研究具有一定的参考价值, 其技术特点对数字光学逻辑计算以及混沌光器件设计与集成是非常有益的, 其研究具有一定的价值和意义.

- [1] Annovazzi-Lodi V, Donati S, Scirè A 1996 *J. IEEE Quantum Electronics* **32** 953
- [2] Yan S L 2012 *Optics & Laser Technology* **44** 83
- [3] 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]
- [4] Yan S L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2819 (in Chinese) [颜森林 2008 物理学报 **57** 2819]
- [5] Wei Y, Fan L, Xia G Q, Chen Y L, Wu Z M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 224203 (in Chinese) [魏月, 樊利, 夏光琼, 陈于淋, 吴正茂 2012 物理学报 **61** 224203]
- [6] Wu L, Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [7] Yan S L 2007 *Chin. Phys.* **16** 3271
- [8] Liu M, Zhang M J, Wang A B, Wang L S, Ji Y N, Ma Z 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 064209 (in Chinese) [刘明, 张明江, 王安帮, 王龙生, 吉勇宁, 马喆 2013 物理学报 **62** 064209]
- [9] Kim J Y, Kang J M, Kim T Y, Han S K *Electronics Letters* 2006 **42** 303
- [10] Sinha S, Ditto W L 1998 *J. Phys. Rev. Lett.* **81**, 2156
- [11] Murali K, Sinha S, Ditto W L 2003 *Int. J. Bifurcation Chaos Appl. Sci. Eng.* **13** 2669
- [12] Chlouverakis K E, Adams M J 2005 *Electronics Letters* **41** 359
- [13] Yan S L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 160505 (in Chinese) [颜森林 2012 物理学报 **61** 160505]
- [14] Yan S L 2011 *Chinese Science Bulletin.* **56** 1264 (in Chinese) [颜森林 2011 科学通报 **56** 1264]
- [15] Fan L, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 0989 (in Chinese) [樊利, 夏光琼, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 0989]
- [16] Wu J G, W Z M, Xia G Q, Tao D, Lin X D, Xi T, Fen G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1854
- [17] Xiao Y, Deng T, Wu Z M, Wu J G, Lin X D, Tang X, Zeng L B, Xia G Q 2012 *Optics Communications* **285** 1442
- [18] Wu J G, Wu Z M, Xi T, Li F, Wei D, Xia G Q 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 587
- [19] Troger J, Nicati P A, Th'evenaz L, Robert Ph A 1999 *IEEE Quantum Electronics* **35** 1713
- [20] Yan S L 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2504
- [21] Li G H, Xu D M, Lai J W, Zhou S P 2000 *Acta Phys. Sin.* **48** 0989 (in Chinese) [李国辉, 徐得名, 赖建文, 周世平 2000 物理学报 **49** 2123]
- [22] Zhu S Q, Lü X, Chen X F, Thornbrug K S, Jr., VanWiggeren G D, Roy R 2000 *Chin. Phys.* **9** 337

Chaotic laser parallel synchronization and its application in all-optical logic gates

Yan Sen-Lin[†]

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

(Received 20 July 2013; revised manuscript received 23 August 2013)

Abstract

We present a “master-slave-response” synchronization system of chaotic multiple-quantum-well lasers. And we study the applications of chaotic parallel synchronization for optical logic gates. An injection multiple-quantum-well laser drives two responding systems of multiple-quantum-well lasers to obtain chaotic synchronization while the injection multiple-quantum-well laser can synchronize the responding systems. We present theoretically the constructions of the fundamental all-optical gates based on the parallel synchronization of responding systems and define their computational principle. By modulating the driving light into the responding systems, all-optical logic gates characterizing logic function are realized by synchronizing or unsynchronizing appropriately the two chaotic states of responding systems. We present all-optical XNOR, NOR, NOT logic gates and their logic computational methods. Numerical simulation result validates the feasibility of the system.

Keywords: chaos, logic gate, synchronization, semiconductor laser

PACS: 05.45.Gg, 42.55.Px, 42.65.Sf, 02.10.Ab

DOI: 10.7498/aps.62.230504

[†] Corresponding author. E-mail: yansenlinbsh@sina.com