

耦合反馈激光混沌振幅调制全光逻辑门及光电复合逻辑门研究

颜森林

南京晓庄学院物理与电子工程学院, 南京 211171

E-mail: yansenlinbsh@sina.com

2010-12-02 收稿, 2011-01-27 接受

江苏省高校自然科学基金基础研究项目(08KJ510019)资助

摘要 理论研究耦合反馈半导体激光器混沌同步及其在光学数字逻辑门中的应用, 构建了三种基本的全光 XNOR, NOR, NOT 门以及光电复合 NOR 光学数字逻辑门的物理模型, 定义了这些逻辑门的计算原理和方法. 基本物理方法是, 让外部光注入到 2 个激光器中产生激光混沌输出, 通过两激光器激光的相互耦合及反馈实现混沌同步. 在此基础上, 利用光的外部调制方法让两相互耦合激光分别在振幅调制下控制混沌同步或非同步, 实现了全光逻辑门的功能与计算. 然后联合激光的外部调制和激光器电流调制, 控制混沌同步或者非同步, 实现了光电复合逻辑门的功能与计算. 另外, 详细地数值分析了激光混沌再同步与再非同步对逻辑输出影响等问题, 结果证明了该方案的科学合理性及可行性.

关键词

逻辑门
半导体激光器
混沌
同步
调制

近十几年来, 人们对混沌同步及其应用等问题进行了广泛的研究^[1~3]. 例如, 在光学系统中发现了超前和滞后混沌同步以及固态激光器混沌同步等^[4~8]. 人们注意到, 激光混沌有大的带宽、低的衰减、对参数具有极高的敏感性等显著特点, 其同步系统非常适合在多信道保密通信、高速远程保密通信、激光混沌测量仪以及激光混沌雷达等系统中应用^[9~13]. 同时, 人们还不断拓展激光混沌同步与应用的新领域. 目前, 混沌同步及其在计算方面的新应用研究也引起了人们的高度重视^[14~19]. 研究发现, 利用混沌系统的同步与非同步就可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. 如果适当组合多个这样的逻辑门, 那么系统就具有多个函数功能的逻辑计算能力. 所以混沌逻辑门研究具有重要的意义^[18~21]. 最近, Chlouverakis 和 Adams^[19]提出一个激光混沌耦合光电或非逻辑门. 虽然耦合能使两混沌激光器同步, 但耦合也能改变

激光器混沌状态, 特别是对激光器电流进行调制时, 也有可能影响系统同步以及系统工作稳定性. 所以, 激光混沌及其在逻辑计算中的应用还要进行广泛的研究.

本文利用激光混沌同步及在保密通信应用中的研究成果^[1~3,9~11]并结合光学逻辑计算原理, 进一步深入研究激光混沌耦合反馈全光及光电调制复合逻辑门. 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. 其中, 全光逻辑门进行激光器外部光振幅调制, 激光器工作稳定性不受调制状态影响, 并有利于光器件集成. 光电调制复合逻辑门则有利于逻辑门组合的灵活性和实用性.

1 物理模型

光注入或光反馈半导体激光器具有容易实现混沌激光输出且易于封装等优点, 现已成为激光混沌保密通信中载波发射机和接收机的首选光器件^[1~3,9~11]. 我们已注意到, 外部光注入半导体激光器

英文引用格式: Yan S L. All-optical and combinational optoelectronic logic gates using chaotic synchronization of coupling-feedback semiconductor lasers and amplitude modulation (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2011, 56: 1264–1271, doi: 10.1360/972010-2069

在理论和实验上有着广泛的研究. 由于外部光的注入, 激光呈现出分岔、混沌等多种复杂动力学行为^[1,22]. 在我们的研究中, 让一个主激光器同时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^[3-13,19]. 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, 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, 使两激光器混沌状态能够保持同步且同步能力被进一步增强, 类似的系统在理论和实验中都有研究^[1-12]. 现把该同步系统应用到光学逻辑计算中, 图1显示该系统的基本逻辑门模块, 其模块组合的对称性是为了更好的同步. 当对两副激光器输出到对方激光器的耦合光进行调制时, 该系统就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用下列方程组描述^[1-13,22]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_1}{dt} = & \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{K}{\tau_L}E_m \cos(\varphi_1) \\ & + \frac{k_1}{\tau_L}[E_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - E_1], \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = & \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_m}{E_1} \sin(-\varphi_1) \\ & + \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \Delta\omega, \\ \frac{dN_1}{dt} = & \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2, \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_2}{dt} = & \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{K}{\tau_L}E_m \cos(\varphi_2) \\ & + \frac{k_2}{\tau_L}[E_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - E_2], \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = & \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{K}{\tau_L} \frac{E_m}{E_2} \sin(-\varphi_2) \\ & + \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) - \Delta\omega, \\ \frac{dN_2}{dt} = & \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - GV_pE_2^2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

其中, 角标“1”和“2”代表两副激光器, E 为激光场慢变部分, φ 为激光相位, N 为激光器载流子数, β_c 为光线宽增强因子, $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 为载流子非线性损耗速率, A_{nr} 为非辐射复合速率, B 为辐射复合因子, C 为俄歇复合因子. $\tau_L = 2n_gL/c$ 为光在激光器腔

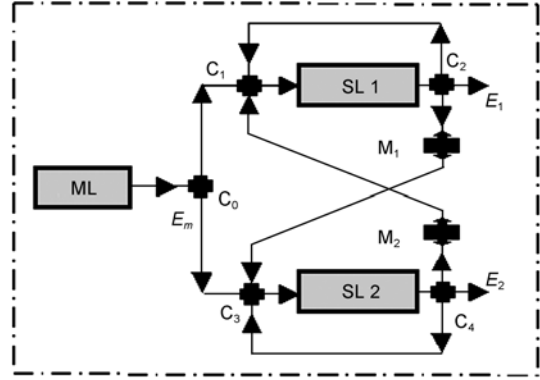


图1 基本逻辑门模块

ML 为主激光器, SL 1 和 SL 2 为两个副激光器; C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 为分光耦合器; M_1 和 M_2 为光调制器

长 L 内来回一周的时间, c 为真空中的光速, $n_g = c/v_g$ 为激光器群速折射率, $\gamma_p = v_g\alpha_m$ 为光子损耗速率, α_m 为光子损耗系数. I 为驱动电流, q 为单位电荷. 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 为增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 为压缩和限制因子, V 为腔体积, V_p 为激光模式体积, $N_{th} = n_{th}V$ 为激光透明时的载流子数, n_{th} 为它的密度值, E_s 为饱和光子场强, E_m 为注入光强度, $\Delta\omega$ 为注入光和激光频率失谐, K 为光注入系数, k 是光耦合-反馈系数. 数值模拟时选取表1激光器参量^[22]. 如选取 $I_1 = I_2 = I$, $k_1 = k_2 = k$ 时, 图2为系统取得的激光混沌同步, 该系统可作为逻辑门组织单元基础. 利用混沌键控编码和光通信中的光外部调制方法^[1-4,9,10], 让两相互耦合激光分别在光振幅调制器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. 这是一个组合改进方案, 其技术特点是利用了激光混沌键控编码以及激光外部调制二个方法. 其中, 光的外部调制广泛应用在光通信中, 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. 同时, 我们还利用该系统进行激光器电流和激光器外部光的联合调制, 去实现光电复合逻辑功能和计算.

2 全光逻辑门

2.1 双振幅调制控制下的全光或非门

让两调制器分别对两激光器输出到对方的激光进行振幅调制, 控制混沌同步或者非同步, 可实现全

表1 激光器参量

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

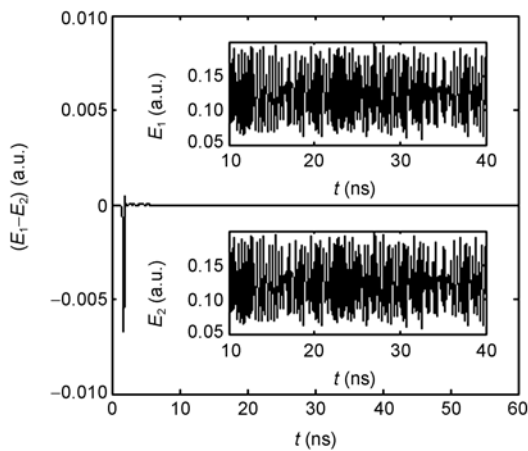


图2 系统混沌渐近同步的取得
插图为两激光波形

光或非门的功能与计算. 例如, 对 SL 1 输出到 SL 2 的激光信号在振幅加法调制控制下进行调制, 调制信号是 $A_1 \times S_1$, 其中在数值模拟中取调制振幅 $A_1=0.01$, 逻辑输入信号 S_1 值在 0 和 1 之间变化; 同时, 对 SL 2 输出到 SL 1 的激光信号在振幅加法调制控制下进行调制, 调制信号是 $A_2 \times S_2$, 其中在数值模拟中取调制振幅 $A_2=0.02$, 逻辑输入信号 S_2 值在 0 和 1 之间变化. 当 $(S_1, S_2) = (0, 0)$ 时, 激光同步就可以实现; 当 $(S_1, S_2) = (1, 1)$, 或者 $(S_1, S_2) = (1, 0)$, 或者 $(S_1, S_2) = (0, 1)$, 即 $(S_1, S_2) \neq (0, 0)$ 时, 激光同步就不能取得, 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“非”与“或”的计算. 如同步代表逻辑输出“1”, 非同步代表逻辑输出“0”, 通过两激光器输出激光的同步解调, 系统就具有“非”与“或”的逻辑计算功能. 在数值计算中, 方程组(1)还需要改写, 其中(1.1)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

$$\begin{aligned} & \frac{k_1}{\tau_L} [(E_2 + A_2 \times S_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - E_1], \\ & \frac{k_1}{\tau_L} \frac{(E_2 + A_2 \times S_2)}{E_1} \sin(\varphi_2 - \varphi_1). \end{aligned} \quad (2.1)$$

(1.2)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

$$\begin{aligned} & \frac{k_2}{\tau_L} [(E_1 + A_1 \times S_1) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - E_2], \\ & \frac{k_2}{\tau_L} \frac{(E_1 + A_1 \times S_1)}{E_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned} \quad (2.1)$$

利用方程组(1)和(2), 数值结果如图3所示, 其中 (a)为 SL 1 输出到 SL 2 激光调制信号 S_1 形式, (b)为 SL 2 输出到 SL 1 激光调制信号 S_2 形式, (c)为激光混沌同步解调, (d)为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振幅调制下可实现全光或非计算功能.

2.2 同振幅调制控制下的全光同或门

让两调制器对两激光器输出到对方的激光进行同振幅大小调制, 可控制混沌同步或者非同步, 即能实现全光同或门的功能与计算. 例如, 对 SL 1 输出到 SL 2 的激光信号在振幅加法调制控制下进行调制, 调制信号是 $A \times S_1$, 其中在数值模拟中取调制振幅 $A=0.015$, 逻辑输入信号 S_1 值在 0 和 1 之间变化; 同时, 对 SL 2 输出到 SL 2 的激光信号在振幅加法调制控制下进行调制, 调制信号是 $A \times S_2$, 逻辑输入信号 S_2 值在 0 和 1 之间变化. 当 $(S_1, S_2) = (0, 0)$, 或者 $(S_1, S_2) = (1, 1)$

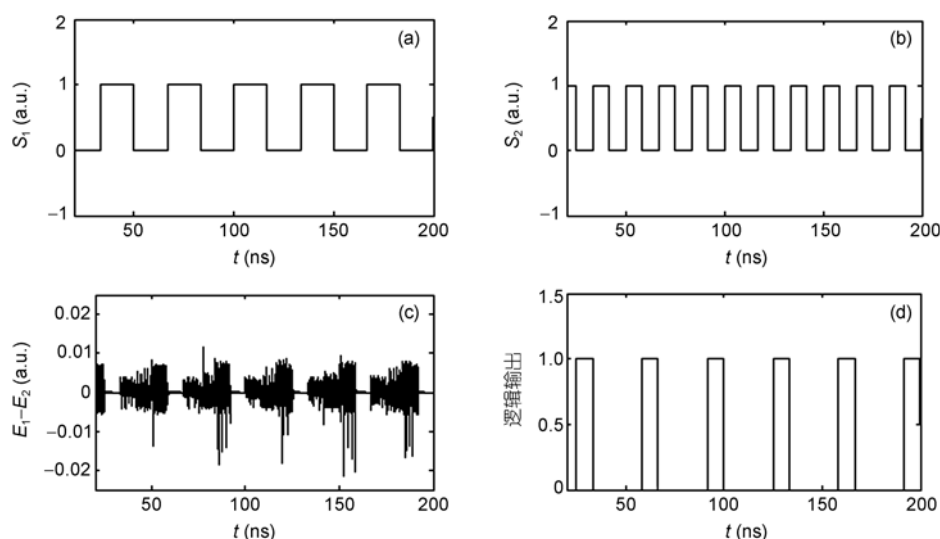


图3 NOR 计算

(a) SL 1 调制信号; (b) SL 2 调制信号; (c) 同步解调; (d) 逻辑信号输出

时, 即 $S_1 = S_2$ 时, 激光同步就可以实现; 当 $(S_1, S_2) = (1, 0)$, 或者 $(S_1, S_2) = (0, 1)$, 即 $S_1 \neq S_2$ 时, 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. 如同步代表逻辑输出“1”, 非同步代表逻辑输出“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, 仅对方程组(2)中的两调制项 $A_1 \times S_1$ 和 $A_2 \times S_2$ 中的 A_1 和 A_2 进行改写: 让 $A_1 = A_2 = A$. 数值结果如图4所示, 其中(a)为 SL 1 输出到 SL 2 激光调制信号 S_1

形式, (b)为 SL 2 输出到 SL 1 激光调制信号 S_2 形式, (c)为激光混沌同步解调, (d)为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同振幅调制下可实现全光或非计算功能.

2.3 单振幅调制控制下的全光非门

对一个耦合光进行调制, 对另一个耦合光不进行调制, 也可控制混沌同步或者非同步, 并能最终实现全光非逻辑门的功能与计算. 例如, 对 SL 2 输出到 SL 1 的激光进行振幅加法调制, 调制信号是 $A_3 \times S_2$,

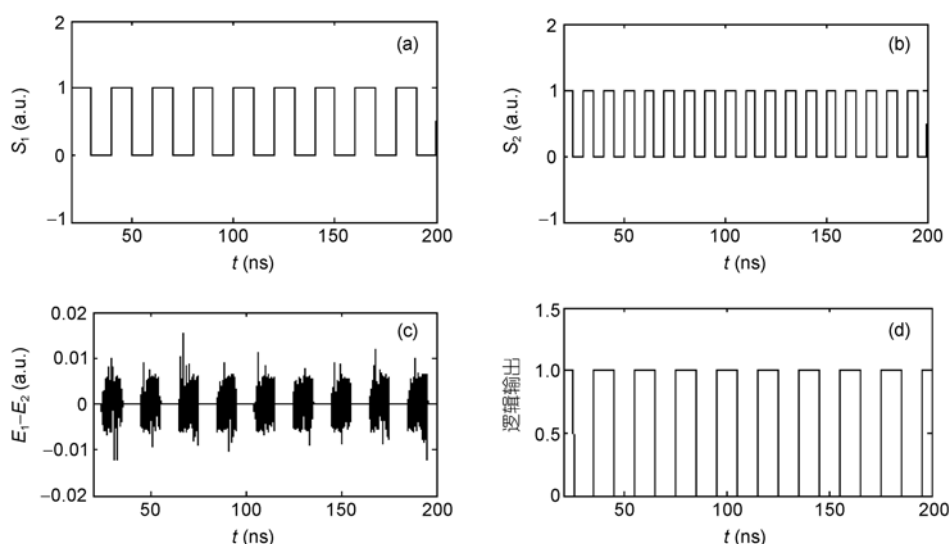


图4 XNOR 计算

(a) SL 1 调制信号; (b) SL 2 调制信号; (c) 同步解调; (d) 逻辑信号输出

其中在数值模拟中取调制振幅 $A_3 = 0.015$, 逻辑输入信号 S_2 值在 0 和 1 之间变化. 在 $S_2 = 0$ 情况下, 激光同步可实现. 在 $S_2 = 1$ 情况下, 激光不同步, 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, 仅对方程组(2)中的两调制项 $A_1 \times S_1$ 和 $A_2 \times S_2$ 中的 A_1 和 A_2 进行改写: 其中, 让调制振幅 $A_1 = 0$ (意味着没有进行调制), $A_2 = A_3 = 0.025$. 数值结果如图 5 所示, 其中(a)为 SL 2 输出到 SL 1 激光调制信号 S_2 形式, (b)为激光混沌同步解调, (c)为通过激光同步与非同步比较后的逻辑信号输出. 结果证明了该系统进行外部光单调制能够实现全光非门功能与计算.

3 光电复合逻辑门

如果既对激光器输出到对方的光进行振幅调制, 又对激光器驱动电流进行调制, 系统能够实现混沌同步或者非同步, 那么它就能最终实现光电复合逻辑门的功能与计算. 在数值计算中, 如仅对激光器 2 的驱动电流以及输送到激光器 1 的光进行联合调制时, 可把方程(1)中激光器 2 的驱动电流项改写为

$$I_2 = I + \Delta I \times S_{i1}, \quad (3a)$$

输送到激光器 1 的光(进行振幅加法调制时)项改写为

$$\frac{k_1}{\tau_L} [(E_2 + A \times S_2) \cos(\varphi_2 - \varphi_1) - E_1], \quad (3b)$$

$$\frac{k_1 (E_2 + A \times S_2)}{\tau_L E_1} \sin(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (3c)$$

其中 S_{i1} 和 S_2 都是逻辑输入调制信号, 都在 0 和 1 之间变化. 在计算中取电流调制幅度 $\Delta I = 2\%I$, 光的调制振幅 $A = 0.015$. 该逻辑门功能特点是: 当 $(S_{i1}, S_2) = (0, 0)$ 时, 激光同步可实现, 则逻辑输出设定为“1”; 当 $(S_{i1}, S_2) = (1, 1)$, 或者 $(S_{i1}, S_2) = (1, 0)$, 或者 $(S_{i1}, S_2) = (0, 1)$, 即 $(S_{i1}, S_2) \neq (0, 0)$ 时, 激光非同步就会出现, 则逻辑输出设定为“0”. 通过观测激光同步和非同步, 系统就可进行“同”与“或”的计算. 数值结果如图 6 所示, 其中(a)为 SL 2 驱动电流调制信号 S_{i1} 形式, (b)为 SL 2 输出到 SL 1 激光调制信号 S_2 形式, (c)为激光混沌同步解调, (d)为通过激光同步与非同步比较后的逻辑信号输出. 数值结果证明该系统可实现光电复合同或门功能与计算. 当然, 我们还可以对其他物理量进行调制以实现多种逻辑门功能等.

4 再同步与再非同步的影响

系统再同步将限制激光同步解调速率, 影响逻辑计算与输出速率. 图 7 为全光 NOT 计算解调, 其中 $A_3 = 0.02$, 逻辑信号输入字节速率为 0.4 GHz. 理论上激光同步将在时间 58.75~60 ns 之间出现一次. 事实上, 激光取得再同步还是要花费一定时间. 可发

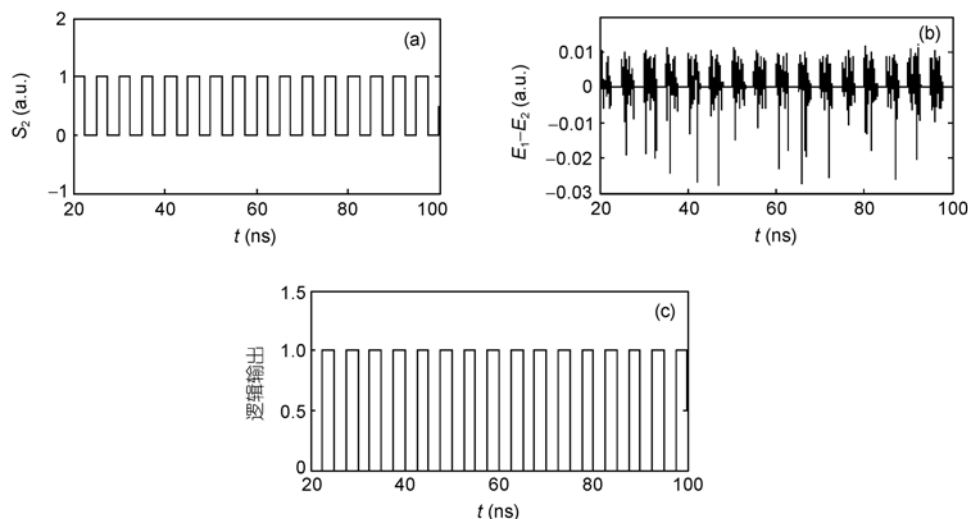


图 5 NOT 计算

(a) SL 2 调制信号; (b) 同步解调; (c) 逻辑信号输出

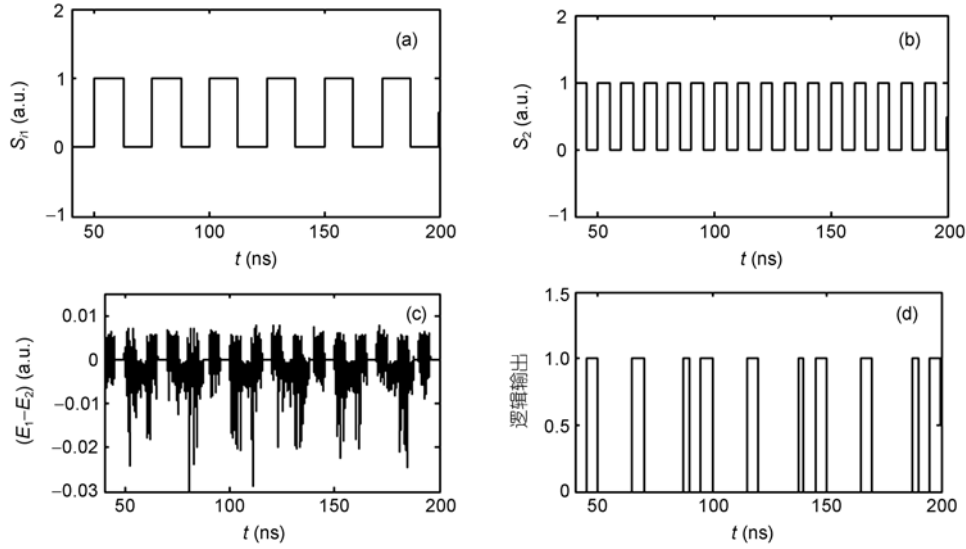


图 6 光电复合 NOR 计算

(a) SL 2 驱动电流调制信号; (b) SL 2 光调制信号; (c) 同步解调; (d) 逻辑信号输出

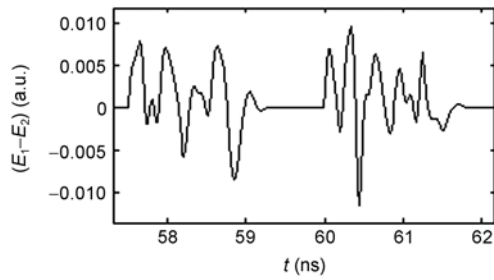


图 7 NOT 门解调

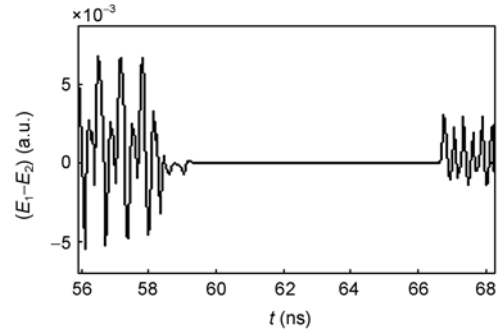


图 8 NOR 门解调

现: 在 58.86 ns 时, 同步差是 -8.6×10^{-3} ; 在 59.05 ns 时, 同步差是 1.9×10^{-4} ; 在 59.19 ns 时, 同步差是 -1.9×10^{-4} ; 在 59.33 s 时, 同步差是 1.8×10^{-5} . 即同步差在零值附近随时间呈现衰减振荡, 其中同步差幅度比值为 $1.8 \times 10^{-5}/8.6 \times 10^{-3} \approx 0.21\%$, 说明同步差振荡幅度下降到 0.21%, 即经过约 0.6 ns 后, 渐近同步逐步取得, 这意味着同步是可以识别的. 而当 60.06 ns 时, 同步差幅度上升到 7×10^{-3} , 而同步差幅度比值为 $7 \times 10^{-3}/1.8 \times 10^{-5} \approx 388.9$, 说明同步差振荡幅度已上升了 388.9 倍, 这预示着非同步出现了, 其中非同步出现用时 0.06 ns. 如果我们适当设定逻辑判断门限值, 让判断延时 0.6 ns, 则同步与非同步将立即判决实现.

图 8 是图 3(c) 的局部放大, 理论上在时间 58.35~66.63 ns 之间将出现一次同步. 事实上, 发现同步差在零值附近随时间也呈现一个快速衰减振荡. 在

58.35 ns 时, 同步差是 -3.2×10^{-3} ; 在 58.62 ns 时, 同步差是 -5.95×10^{-3} ; 在 59.07 ns 时, 同步差是 -6.5×10^{-4} , 此时同步差已下降到 $6.5 \times 10^{-4}/3.2 \times 10^{-3} \approx 4.92\%$; 在 59.39 s 时, 同步差是 -1.6×10^{-5} , 同步差则进一步下降到 $1.6 \times 10^{-5}/3.2 \times 10^{-3} = 0.5\%$. 这意味着, 渐近同步已逐步取得, 并且约 1 ns 后同步就可识别. 而当 66.76 ns 时, 同步差幅度是 3.1×10^{-3} , 而同步差幅度比值是 $3.1 \times 10^{-3}/1.6 \times 10^{-5} \approx 193.8$, 即同步差振荡幅度上升了 193.8 倍, 这预示着非同步出现了, 其中非同步出现的迟延时间为 0.13 ns.

图 9 是图 4(c) 的局部放大, 理论上在时间 55~65 ns 之间将出现一次同步. 但发现同步差在零值附近随时间也有一个快速衰减振荡过程. 在 55.24 ns, 同步差是 -4×10^{-3} ; 在 55.604 ns 时, 同步差是 -4.84×10^{-5} , 同步差下降到 $4.84 \times 10^{-5}/4 \times 10^{-3} = 1.21\%$; 在 59.39 s

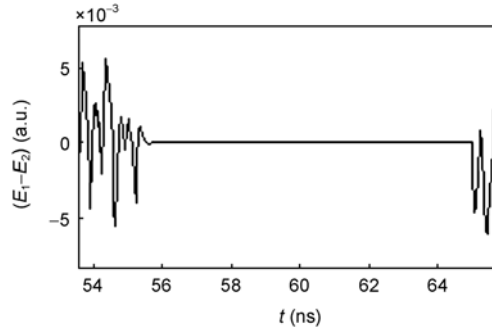


图9 XNOR 门解调

时, 同步差是 -1.6×10^{-5} , 则进一步下降到 $1.6 \times 10^{-5} / 3.2 \times 10^{-3} = 0.5\%$. 事实上, 这就意味着系统已能够判断出同步了. 而当 65.06 ns 时, 同步差幅度是 -4.7×10^{-3} , 而 $4.7 \times 10^{-3} / 1.6 \times 10^{-5} \approx 293.8$, 则同步差振荡幅度上升了 293.8 倍, 这预示非同步出现了, 其中非同步迟延时间是 0.06 s.

图 10 是图 6(c) 的局部放大, 理论上在时间 137.5~140 ns 之间将出现一次同步. 在时间 137.5 ns 后, 同步差呈现一个快速衰减振荡过程. 在 137.5 ns, 同步差是 -5×10^{-3} ; 在 137.15 ns 时, 同步差是 2.2×10^{-5} , 同步差下降到 $2.2 \times 10^{-5} / 5 \times 10^{-3} = 0.44\%$; 在 137.88 ns 时, 同步差是 9.5×10^{-6} , 同步差下降到 $9.5 \times 10^{-6} / 5 \times 10^{-3} = 0.19\%$. 这意味着系统在 0.38 ns 内就能够完全

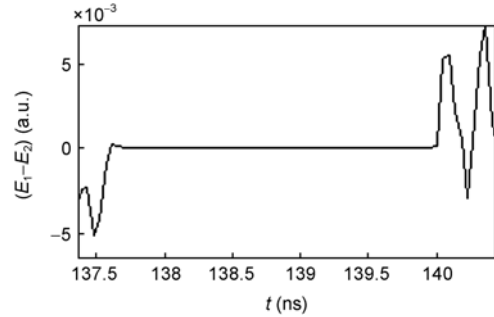


图10 光电复合 NOR 门解调

判断出同步. 而当 140.05 ns 时, 同步差是 -5.4×10^{-3} , 而 $5.4 \times 10^{-3} / 9.5 \times 10^{-6} \approx 568$, 即同步差振荡幅度在迟延 0.05 ns 后上升了 568 倍, 预示非同步出现了.

5 结论

关于噪声影响和参数失配等问题, 相关文献中已有报道^[1~4]. 本文主要提出半导体激光器混沌耦合反馈同步系统在实现四种基本的全光及光电复合逻辑门中的应用. 该系统确实能实现全光及光电复合逻辑门的功能并能快速地进行逻辑计算. 虽然再同步限制了系统速率, 但仍高于电路系统^[8~10]. 数值结果证明了该系统具有可行性. 该系统是半导体激光混沌在光学逻辑门应用中的又一个新案例, 对光学逻辑计算与器件集成设计具有一定的参考价值.

参考文献

- 1 Annovazzi-Lodi V, Donati S, Scirè A. Synchronization of chaotic injected laser systems and its application to optical cryptography. *J IEEE Quant Electron*, 1996, 32: 953–959
- 2 Wu L, Zhu S Q. Communications using multi-mode laser system based chaotic synchronization. *Chin Phys*, 2003, 12: 300–304
- 3 Yan S L. Study of dual-directional high rate secure communication systems using chaotic multiple-quantum-well lasers. *Chin Phys*, 2007, 16: 3271–3278
- 4 Voss H U. Anticipating chaotic synchronization. *Phys Rev E*, 2000, 61: 5115–5119
- 5 Masoller C. Anticipation in synchronization of chaotic semiconductor lasers with optical feedback. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 2782–2785
- 6 Sivaprakasam S, Shahverdiev E M, Spencer P S, et al. Experimental demonstration of anticipating synchronization in chaotic semiconductor lasers with optical feedback. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 154101–154103
- 7 Sivaprakasam S, Spencer P S, Rees P, et al. Transition between anticipating and lag synchronization in chaotic external-cavity laser diodes. *Opt Lett*, 2002, 27: 1250–1252
- 8 Wu L, Zhu S. Coexistence and switching of anticipating synchronization and lag synchronization in an optical system. *Phys Lett A*, 2003, 315: 101–108
- 9 Van Wiggeren G D, Roy R. Communication with chaotic lasers. *Science*, 1998, 279: 1198–1200
- 10 Wu L, Zhu S. Multi-channel communication using chaotic synchronization of multi-mode lasers. *Phys Lett A*, 2003, 308: 157–161
- 11 操良平, 夏光琼, 邓涛, 等. 基于非相干光反馈半导体激光器的双向混沌通信研究. *物理学报*, 2010, 59: 5541–5546
- 12 龚天安, 王云才, 孔令琴, 等. 面向汽车防撞的混沌激光雷达. *中国激光*, 2009, 36: 2426–2430
- 13 Zhang W L, Pan W, Luo B, et al. Polarization switching of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers. *J Opt Soc Am B*, 2007, 24: 1276–1282

- 14 Sinha S, Ditto W L. Dynamics based computation. *Phys Rev Lett*, 1998, 81: 2156–2159
- 15 Murali K, Sina S, Ditto W L. Implementation of NOR gate by a chaotic Chua's circuit. *Int J Bifurcat Chaos Apple Sci Eng*, 2003, 13: 2669–2972
- 16 Munakata T, Sinha S, Ditto W L. Chaos computing: Implementation of fundamental logical gates by chaotic elements. *IEEE Trans Circ Syst*, 2002, 49: 1629–1633
- 17 Murali K, Sinha S, Ditto W L. Realization of the fundamental NOR gate using a chaotic circuit. *Phys Rev E*, 2003, 68: 016205
- 18 Sinha S, Munakata T, Ditto W L. Flexible parallel implementation of logic gates using chaotic elements. *Phys Rev E*, 2002, 65: 036216
- 19 Chlouverakis K E, Adams M J. Optoelectronic realization of NOR logic gate using chaotic two-section lasers. *Electron Lett*, 2005, 41: 359–360
- 20 Soto H, Topomondzo J D, Erasme D, et al. All-optical NOR gates with two and three input logic signals based on cross-polarization modulation in a semiconductor optical amplifier. *Opt Commun*, 2003, 218: 243–247
- 21 Kim J Y, Kang J M, Kim T Y, et al. 10 Gbit/s all-optical composite logic gates with XOR, NOR, OR and NAND functions using SOA-MZI structures. *Electron Lett*, 2006, 42: 303–304
- 22 Troger J, Nicati P A, Thevenaz L, et al. Novel measurement scheme for injection locking experiments. *IEEE Quant Electron*, 1999, 35: 1713–1717

All-optical and combinational optoelectronic logic gates using chaotic synchronization of coupling-feedback semiconductor lasers and amplitude modulation

YAN SenLin

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

Chaotic synchronization of coupling-feedback semiconductor laser diodes is theoretically studied for optical logic gate applications. The constructions of the fundamental all-optical XNOR, NOR, NOT gates and combinatorial optoelectronic logic gate and their physical models are presented. The computational principles and methods are defined for these logic gates. Two laser diodes commonly driven by a monochromatic light beam become chaos. Chaotic synchronization between the two lasers is achieved by coupling-feedback. Based on the system and an external optical modulation method, the all-optical logic gates are performed for digit computation via the amplitude modulator modulating the coupling light to synchronize or un-synchronize two chaotic states. And the combinational optoelectronic logic gate is implemented for digit computation by modulating the amplitude of coupling light and the current to synchronize or un-synchronize two chaotic states. Lastly, the effect of resynchronization and reunsynchronization on logic output was analyzed numerically, in detail. Numerical simulations show the validity and feasibility of the methods.

logic gate, semiconductor laser, chaos, synchronization, modulation

doi: 10.1360/972010-2069