

引用格式: XIAO Luyao, TANG Xi, LIN Xiaodong, et al. Reconfigurable Logic Operation Based on Optically Injected VCSEL-SA Subject to Current Modulation[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(11):1114005

肖路遥,唐曦,林晓东,等. 电流调制下光注入 VCSEL-SA 的可重构逻辑运算[J]. 光子学报, 2022, 51(11):1114005

# 电流调制下光注入 VCSEL-SA 的可重构逻辑运算

肖路遥<sup>1,2</sup>, 唐曦<sup>1,2</sup>, 林晓东<sup>1,2</sup>, 高子叶<sup>1,2</sup>, 段志飞<sup>1,2</sup>, 杜潇睿<sup>1,2</sup>,  
夏光琼<sup>1,2</sup>, 吴正茂<sup>1,2</sup>, 邓涛<sup>1,2</sup>

(1 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2 微纳结构光电子学重庆市重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 基于电流调制和光注入共同作用下的带有饱和吸收体的垂直腔面发射激光器(VCSEL-SA), 提出了一种可重构的光电逻辑门(NOT, NAND, NOR, XOR), 数值研究了电流调制下 VCSEL-SA 的 spiking 动力学特性, 及电流调制下光注入 VCSEL-SA 的逻辑运算性能。研究表明, 对于电流调制下的光注入 VCSEL-SA, 光电逻辑门可以在一定的偏置电流范围内实现。通过选取合适的调制电流, 可以实现重构的逻辑运算(NAND, NOR), 且两个调制信号之间的时延对逻辑运算性能影响较小。通过改变电流调制信号的输入方式并移除光注入信号, VCSEL-SA 可以实现 XOR 逻辑运算。此外, 基于电流调制下光注入 VCSEL-SA 的可重构逻辑运算对噪声有较好的容忍性。研究结果可为未来光子神经网络解决复杂的信号处理任务提供一定的理论基础。

**关键词:** 带有饱和吸收体的垂直腔面发射激光器(VCSEL-SA); spiking 动力学特性; 电流调制; 可重构性; 光电逻辑门

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225111.1114005

## 0 引言

随着社会的迅猛发展, 人工智能、互联网、多媒体、5G 通信、大数据业务等现代科技技术已经广泛应用于国民生产生活, 全社会对算力的需求以每年至少 20% 的速度递增, 由此对计算系统的算力提出了前所未有的挑战。目前, 我国的“神威-太湖之光”超级计算机的峰值计算能力可以达到 12.5 亿亿次/秒。然而, 这种传统的存算分离的冯诺依曼架构在存储、运算速率、功耗等方面的瓶颈限制了其进一步发展。此外, 沿用至今的“摩尔定律”也因 CMOS 工艺的限制而遭遇瓶颈, 集成电路的发展已进入后摩尔时代。在此背景下, 人工智能的研究与发展备受关注, 基于硅基电子器件或光学器件的光子神经网络已经变成了该领域的焦点问题。光子神经网络在处理复杂的人工智能任务时具有较低的功耗和高速率的优势, 可克服冯诺依曼架构的局限, 因而可以提供一种新的可行性方案用于解决诸如决策、深度学习和优化、模式识别以及感知信息处理等更复杂的计算任务。近年来, 光子神经网络因其在速度和能量效率方面明显优于传统电子方法而成为研究热点<sup>[1-5]</sup>。迄今为止, 神经形态光子器件的研究引起了科研工作者的广泛关注, 例如光子晶体结构<sup>[6]</sup>, 共振隧穿二极管光电探测器<sup>[7]</sup>, 光纤激光器<sup>[8]</sup>, 半导体光放大器<sup>[9]</sup>, 光学调制器<sup>[10]</sup>和半导体激光器<sup>[11-16]</sup>等。在这些神经形态光子器件中, 半导体激光器具有与生物神经元相似的多种行为, 且可以产生比生物神经快达 8 个数量级的脉冲响应, 因而可作为一种理想的人工神经元。目前, 不同类型的半导体激光器已经在神经形

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 61875167), 重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2019jcyj-msxmX0136), 重庆市教委科学与技术研究重点项目(No. KJZD-K202100204)

**第一作者:** 肖路遥(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光脉冲神经网络。Email: xlyprogrammer@163.com

**导师(通讯作者):** 邓涛(1982—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光非线性动力学及其应用。Email: dengt@swu.edu.cn

**收稿日期:** 2022-04-19; **录用日期:** 2022-05-30

<http://www.photon.ac.cn>

态计算系统中得到了广泛研究和应用,如微盘激光器<sup>[11]</sup>,微柱激光器<sup>[12]</sup>,微环激光器<sup>[13]</sup>,量子点激光器<sup>[14]</sup>,带有饱和吸收体的激光器<sup>[15]</sup>和垂直腔面发射激光器(Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs)<sup>[16-17]</sup>。特别地,VCSEL具有体积小、功耗低、成本低以及与光纤耦合效率高等优点<sup>[18-19]</sup>,因此,探索VCSEL器件的非线性动力学行为及其在神经拟态计算相关领域的应用可望推动人工智能领域的创新发展。最近,外部刺激下VCSEL光子神经元的spiking动力学行为已经被理论和实验报道<sup>[20-23]</sup>。值得注意的是,在VCSEL中引入饱和吸收体后,可以构建两段式可激发激光器(VCSEL-SA)。与传统的光子神经元模型相比,这种集成的光子神经元类似于LIF模型,其输出的spike信号可携带时空信息,能更好的模拟生物神经元的特性,且能够激发更短的亚纳秒光脉冲,其兴奋阈值也可在一定范围内灵活控制<sup>[24-27]</sup>。因此,VCSEL-SA在光子神经网络相关领域的研究和应用具有巨大的价值。

光学逻辑门作为光网络系统中的基本单元,在光交换、光提取、光计算等复杂的光信息处理任务中起着关键性作用<sup>[28]</sup>。PERRONE S等基于光注入VCSEL,利用噪声和偏振双稳的相互作用实现了随机逻辑门<sup>[29]</sup>,许葛亮等利用外部光反馈注入VCSEL实现了可重构光电混沌逻辑门<sup>[30]</sup>,钟东洲等基于外部光注入VCSEL实现了光电复合逻辑门<sup>[31]</sup>,项水英等基于光注入VCSEL-SA,通过控制抑制窗口进一步实现了全光异或逻辑门<sup>[32]</sup>并基于监督学习算法训练的多层脉冲神经网络完成了XOR分类任务<sup>[33]</sup>。上述研究证实了利用VCSEL器件实现逻辑运算的可能性。因此探究基于VCSEL的逻辑运算架构及其逻辑运算性能对基于VCSEL的光子神经网络构建及其应用有着重要的意义。此外,考虑到可重构的逻辑器件可大大降低未来大规模光子集成的成本,提高逻辑器件的利用效率。本文提出了基于电流调制和光注入共同作用下的VCSEL-SA实现可重构光电逻辑门(NOT, NAND, NOR, XOR)的方案,数值分析了影响逻辑门运算性能的主要因素,并讨论了不同逻辑门实现重构的条件。

## 1 系统模型与理论

图1是基于电流调制下光注入VCSEL-SA的光电逻辑门(NOT, NAND, NOR, XOR)系统结构图。其中,VCSEL-SA的偏置电流略小于阈值电流以避免激光器处于自脉冲振荡状态<sup>[34]</sup>。矩形脉冲信号 $O$ 通过马赫-曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)后注入VCSEL-SA可以使其成功激发一个spike。在此基础上,将任意波形发生器生成的矩形脉冲电信号 $A$ 和 $B$ 通过反相器(Inverter)实现反相,再经偏置器(Bias Tee)与直流偏置耦合后注入到VCSEL-SA,通过合理设置调制电流大小即可实现可重构的光电逻辑门(NOT, NAND, NOR)。另外,移除红色虚线框内的调制器和反相器后,即电信号 $A$ 作为兴奋信号输入VCSEL-SA,而电信号 $B$ 通过反相器实现反相后作为抑制信号输入VCSEL-SA,且此时无光注入信号,通过选取合适的偏置电流以及调制信号幅度,VCSEL-SA可以实现XOR逻辑运算。在所有的逻辑运算中,当VCAEL-SA激发spike时,逻辑运算结果为1,否则为0。

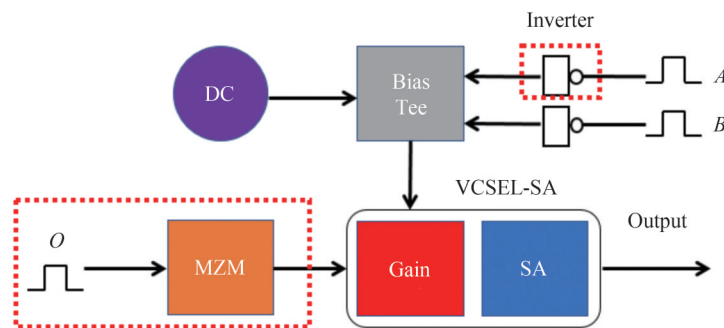


图1 基于VCSEL-SA的光电逻辑门(NOT, NAND, NOR, XOR)的系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectric logic gate (NOT, NAND, NOR, XOR) based on VCSEL-SA

考虑到电流调制和光注入的影响并忽略偏振效应,基于VCSEL-SA的逻辑运算可以用修正的Yamada模型来描述,其速率方程表示为<sup>[15, 35]</sup>

$$\frac{dN_{\text{ph}}}{dt} = \Gamma_a g_a (n_a - n_{0a}) N_{\text{ph}} + \Gamma_s g_s (n_s - n_{0s}) N_{\text{ph}} - \frac{N_{\text{ph}}}{\tau_{\text{ph}}} + V_a \beta B_r n_a^2 \quad (1)$$

$$\frac{dn_a}{dt} = -\Gamma_a g_a (n_a - n_{0a}) \frac{N_{\text{ph}} - k_s F_o(t, \Delta t_1)}{V_a} - \frac{n_a}{\tau_a} + \frac{I_a + I_m F_{A,B}(t, \Delta t_2)}{eV_a} \quad (2)$$

$$\frac{dn_s}{dt} = -\Gamma_s g_s (n_s - n_{0s}) \frac{N_{\text{ph}}}{V_s} - \frac{n_s}{\tau_s} + \frac{I_s}{eV_s} \quad (3)$$

$$P(t) \approx \frac{\eta_c \Gamma_a hc}{\tau_{\text{ph}} \lambda} N_{\text{ph}}(t) \quad (4)$$

式中,下标 a 和 s 分别表示增益区和饱和吸收区,  $N_{\text{ph}}(t)$  表示腔内总的光子数,  $P(t)$  是激光器的输出功率,  $n(t)$  是载流子数,  $I$  是偏置电流。  $k_s F_o(t, \Delta t_1)$  代表耦合到激光器增益区的光信号,  $I_m F_{A,B}(t, \Delta t_2)$  代表调制信号, 其中  $k_s$  是注入强度,  $I_m$  是调制信号的幅度,  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$  分别表示光信号和电信号的扰动时间。 VCSEL-SA 的其他参数如表 1 所示, 使用四阶龙格库塔法数值求解上述方程。

表 1 VCSEL-SA 的参数值  
Table 1 Typical VCSEL-SA parameters

Parameter	Description	Value
$\Gamma_a$	Confinement factor in active region	0.06
$\Gamma_s$	Confinement factor in absorber region	0.05
$\tau_a$	Carrier lifetime in gain region/ns	1
$\tau_s$	Carrier lifetime in absorber region/ps	100
$\tau_{\text{ph}}$	Photon lifetime/ps	4.8
$h$	Planck constant/(J·s)	$6.634 \times 10^{-34}$
$V_a$	Gain region volume/ $\text{m}^3$	$2.4 \times 10^{-18}$
$V_s$	Absorber region volume/ $\text{m}^3$	$2.4 \times 10^{-18}$
$c$	Speed of light/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$3 \times 10^8$
$g_a$	Differential gain/loss in gain region/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$2.9 \times 10^{-12}$
$g_s$	Differential gain/loss in absorber region/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$14.5 \times 10^{-12}$
$n_{0a}$	Transparency carrier density in gain region/ $\text{m}^{-3}$	$1.1 \times 10^{24}$
$n_{0s}$	Transparency carrier density in absorber region/ $\text{m}^{-3}$	$0.89 \times 10^{24}$
$B_r$	Bimolecular recombination factor/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$1 \times 10^{-15}$
$\beta$	Spontaneous emission coupling factor	$1 \times 10^{-4}$
$\eta_c$	Output power coupling coefficient	0.4
$I_s$	Bias current in absorber region/mA	0
$\lambda$	Laser wavelength/nm	850

## 2 结果与讨论

### 2.1 电流调制下 VCSEL-SA 的 spiking 动力学特性

图 2 给出了无光注入时 VCSEL-SA 在不同调制电流下的输出情况, 其中,  $I_a = 2.3 \text{ mA}$ ,  $\Delta t_2 = 1 \text{ ns}$ ,  $I_m$  分别为 1.5、4.5、7.5、15、30 mA。随着  $I_m$  的增加, VCSEL-SA 输出的 spikes 数目逐渐增多, 且其峰值功率也逐渐增大, spike 间隔越小, 这种现象类似于生物神经元激发的 tonic 脉冲。当  $I_m$  到达 15 mA 时, VCSEL-SA 输出呈现明显的振荡过程。当  $I_m$  继续增加到 30 mA 时, VCSEL-SA 首先会激发出一个大功率 spike, 随后经过短暂的振荡过程快速进入稳定输出态, 这与生物神经元输出的 phasic 脉冲相似, 这些结果与光注入 VCSEL-SA 的 spiking 动力学行为基本一致<sup>[38]</sup>。

图 3 给出了无光注入且调制信号扰动时长  $\Delta t_2$  变化时 VCSEL-SA 输出的情况, 其中,  $I_a = 2.3 \text{ mA}$ ,  $I_m = 1.5 \text{ mA}$ , 扰动时长依次为 1、2、4 ns。从图中可以看出, 随着  $\Delta t_2$  的增加, VCSEL-SA 激发的 spike 数目逐渐增多, 说明 spike 激发的数量与扰动时长  $\Delta t_2$  有关, 这为实现 VCSEL-SA 的 spike 编码和逻辑运算提供了又一种调控手段。

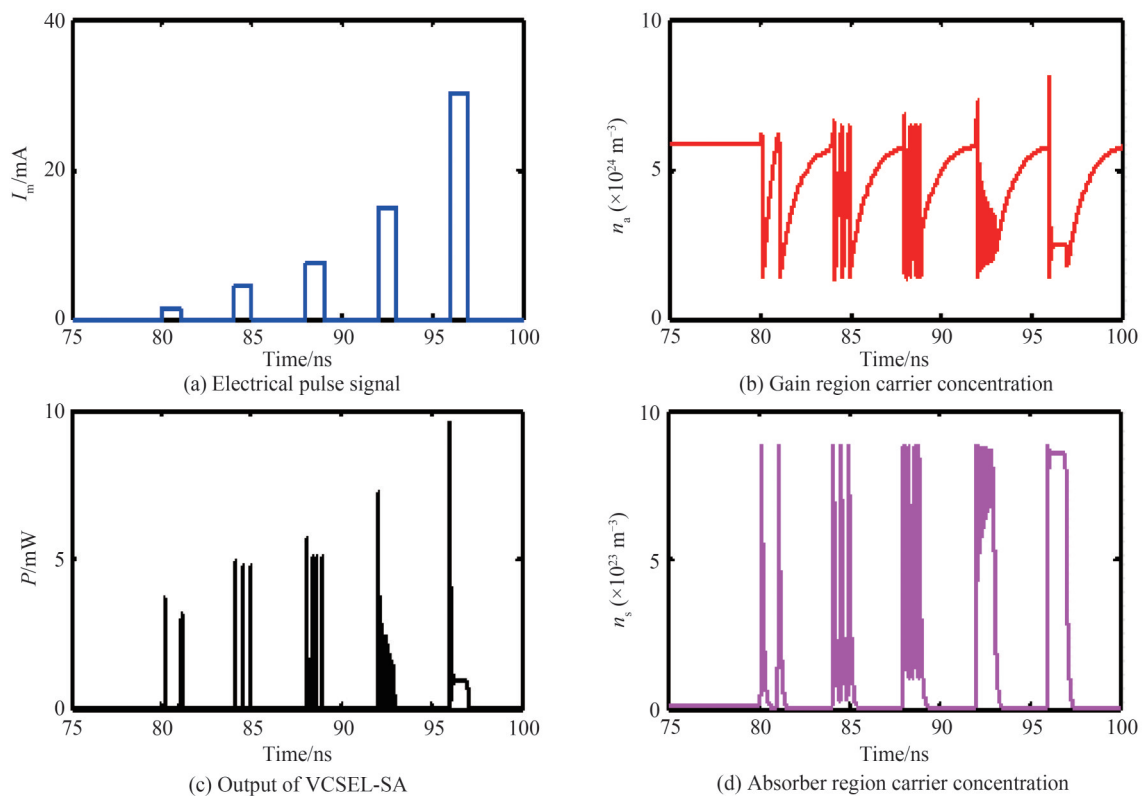


图 2 不同的调制信号幅度下 VCSEL-SA 的输出情况  
 Fig. 2 The output of the VCSEL-SA for different modulation signal amplitude

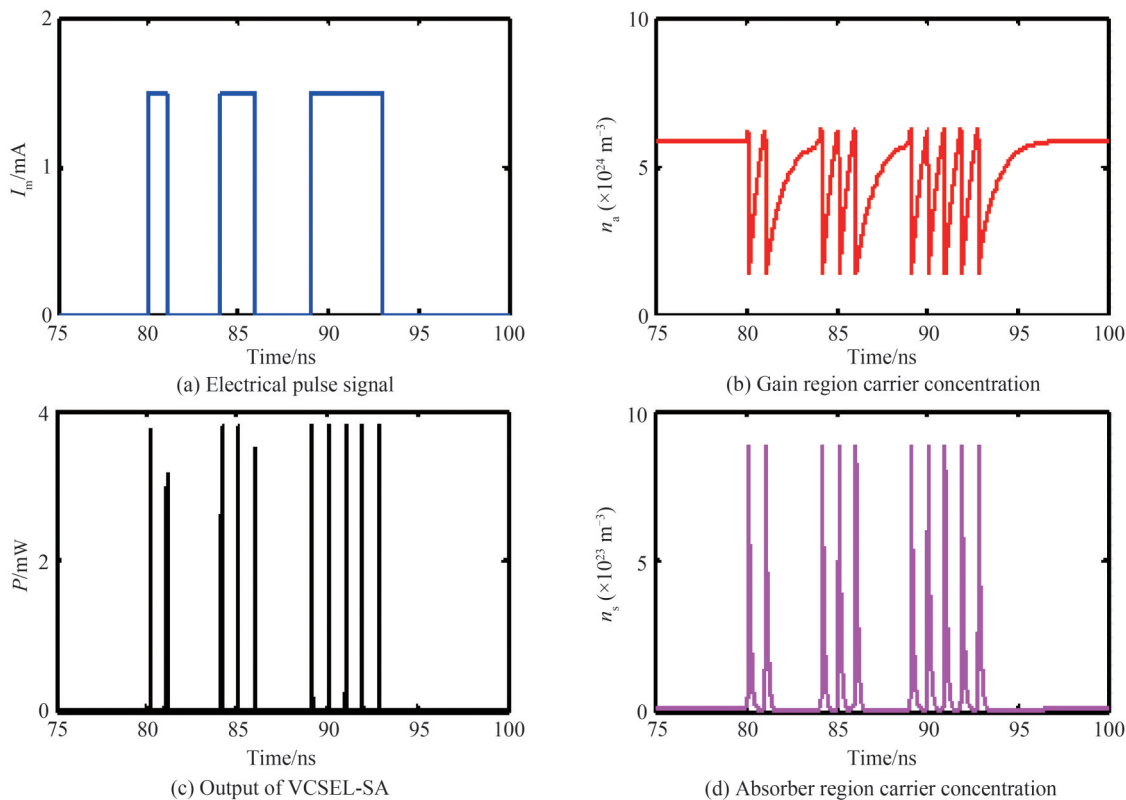


图 3 不同调制信号扰动时间对应的 VCSEL-SA 输出  
 Fig. 3 The output of the VCSEL-SA for modulation signals with different perturbation durations

为了进一步探究外部调制电流信号对光注入 VCSEL-SA 激发的 spike 信号进行抑制的影响。图 4 给出了光注入 VCSEL-SA 在无电流调制和增加电流调制时的输出情况,其中,光注入强度  $k_s=3 \times 10^3$ ,扰动时长  $\Delta t_1=15 \text{ ns}$ ,偏置电流  $I_a=2.3 \text{ mA}$ 。在没有调制信号输入的情况下,光注入 VCSEL-SA 可以输出连续的 spike 信号,如图 4(c)所示。此时,输入一个负脉冲电信号( $I_m=1.5 \text{ mA}, \Delta t_2=5 \text{ ns}$ )对 VCSEL-SA 进行调制,在脉冲作用区输出的 spikes 信号被完全抑制,如图 4(d)所示。这可以解释为输入的负脉冲抑制信号使得激光器增益区载流子的积累难以达到 VCSEL-SA 的兴奋阈值,从而无法激发 spike。由此可见,通过控制光注入和电调制信号,VCSEL-SA 可以灵活的激发 spike 信号或者抑制输出的 spike 信号,这种控制 spike 激发或抑制的方式可用于设计基于 VCSEL-SA 的光电混合型逻辑电路(NOT, NAND, NOR, XOR)。

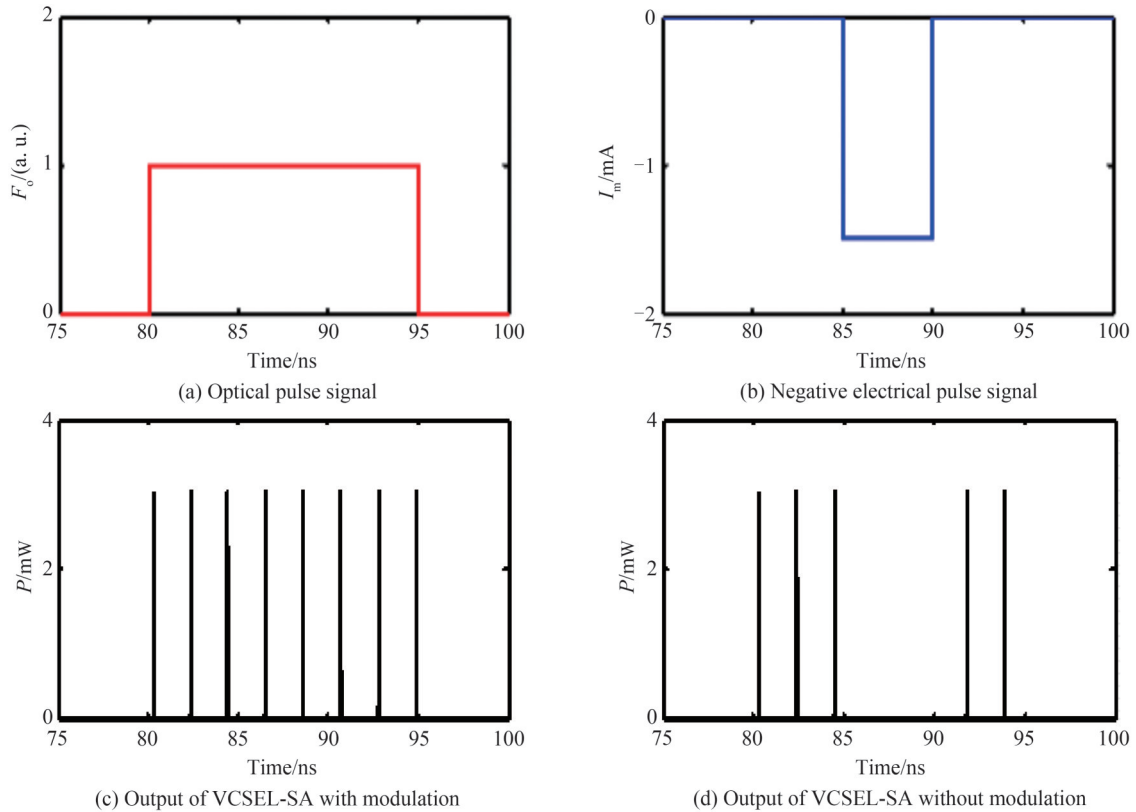


图 4 外部扰动下 VCSEL-SA 的输出情况

Fig. 4 Output of VCSEL-SA under external disturbance

## 2.2 光电逻辑门(NOT, NAND, NOR, XOR)的实现

图 5 给出了光注入 VCSEL-SA 实现 NOT 门逻辑运算的情况。本节中,在未做特别说明的情况下,固定偏置电流  $I_a=2.3 \text{ mA}$ ,光注入强度  $k_s=3 \times 10^3$ ,扰动时长  $\Delta t_1=1 \text{ ns}$ 。在每一个光脉冲注入下,VCSEL-SA 可成功激发一个 spike 信号,如图 5(b)所示。此时,通过反相器对电流调制信号 A(B)进行反相,然后通过偏置器注入 VCSEL-SA,对应的调制信号幅度  $I_m$  依次为 0 mA, 0.2 mA, 0.5 mA, 1 mA,如图 5(c)所示。从图 5(d)可以看出,当反相的电流调制信号较小时,VCSEL-SA 在光脉冲的作用下仍然可以激发 spike 信号。随着电流调制信号的增大,VCSEL-SA 有源区内累积的载流子数减小,无法满足 spike 激发的阈值条件,因而不再生激发 spike 信号。由此可见,通过控制调制信号的强度,可以使 VCSEL-SA 实现 NOT 门的逻辑运算。

图 6 给出了 VCSEL-SA 实现光电逻辑门(NAND, NOR)的情况。在与非门(NAND)逻辑运算中,两路调制电流幅度均设定为 0.3 mA,两路电信号经过反相器反相后分别输出 0011 和 0101,如图 6(b)和(c)所示。从图 6(d)可以看出,两路输入的电信号只要存在“0”,VCSEL-SA 则可以激发 spike 信号。当两路电信号均输出“1”时,VCSEL-SA 有源区的载流子无法达到激发阈值条件,因而不再生激发 spike 信号。对于或非门(NOR)逻辑运算,两路电信号分别输出 0011 和 0101,其调制电流幅度均设定为 1 mA,如图 6(f)和(g)所示。从图 6(h)可以看出,两路输入的电信号只要存在“1”,VCSEL-SA 有源区的载流子则无法达到激发阈值条



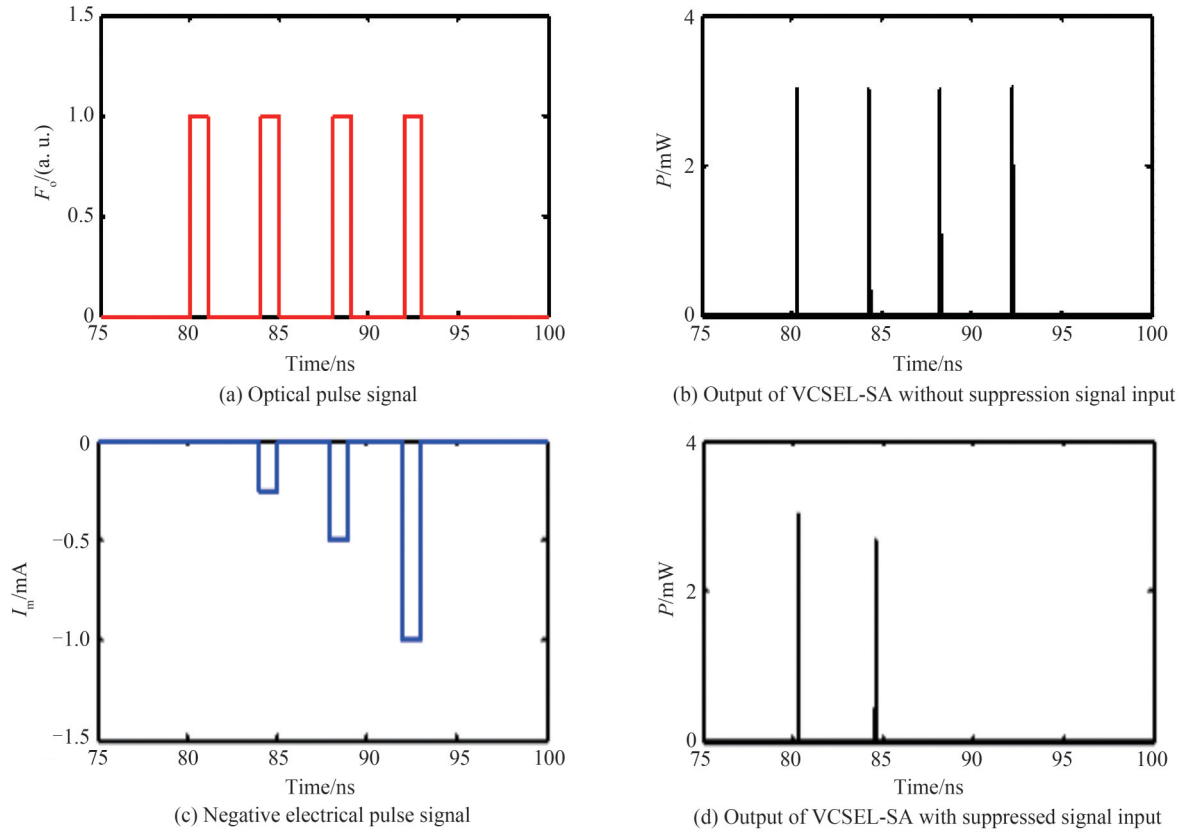


图5 NOT 门逻辑运算的实现  
Fig. 5 Implementation of NOT logic operation

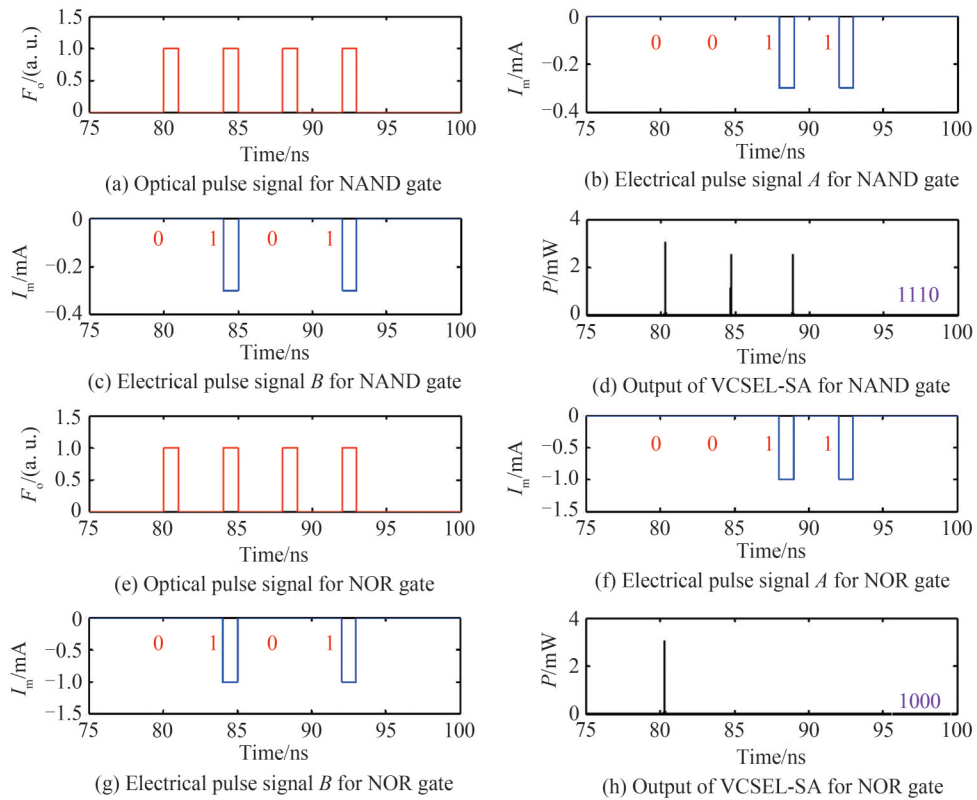


图6 NAND 门和 NOR 门的逻辑运算实现  
Fig. 6 Logic operation implementation of NAND gate and NOR gate

件,此时不再有 spike 信号被激发。仅仅当两路电信号均输出“0”时,VCSEL-SA 可以激发 spike 信号。值得注意的是,调制电流大小的选择与光注入强度及 VCSEL-SA 的偏置电流大小有关,因此,对于光注入 VCSEL-SA,通过合理选择调制电流的强度,VCSEL-SA 可以实现光电逻辑门(NAND, NOR)的逻辑运算功能。

图 7 给出了实现光电逻辑门(XOR)的情况。在执行 XOR 逻辑运算时,外部光注入信号不再需要,第一路调制信号的反相器需要移除且需对两路调制电流信号进行处理。通过数字信号处理技术把  $A$  和  $B$  两路信号的每一位码元转换为原码后并补加上其取反的码元,即“0”转换为“01”,“1”转换为“10”,图 7(a)和(b)分别表示处理后的  $A$ 、 $B$  两路信号,其中蓝色实线是原信号,红色实线是补加的信号。经过处理后的  $A$  ('01' '01' '10' '10')和  $B$  ('01' '10' '01' '10')两路调制电信号同时注入 VCSEL-SA, XOR 逻辑运算的结果如图 7(c)所示。值得注意的是,与光电逻辑门(NAND, NOR, NOT)相比, XOR 逻辑操作的实现不需要光信号的注入,仅仅需要改变电流调制信号的输入方式,即调制信号需要增加相应的码元且调制信号  $A$  无需反相。由此可见,通过控制光注入信号、直流偏置及调制信号的输入方式即可使该系统实现不同逻辑运算功能的转换,从而实现逻辑门的重构。需要指出的是,为了直观地表征系统的逻辑运算功能,在模拟过程中相邻扰动信号的时间间隔设定为 5 ns,且这个时间在一定的范围内可调。在实际应用中,这个时间间隔会受到偏置电流、光注入强度等参数的影响,本质上由神经元的不应期决定。

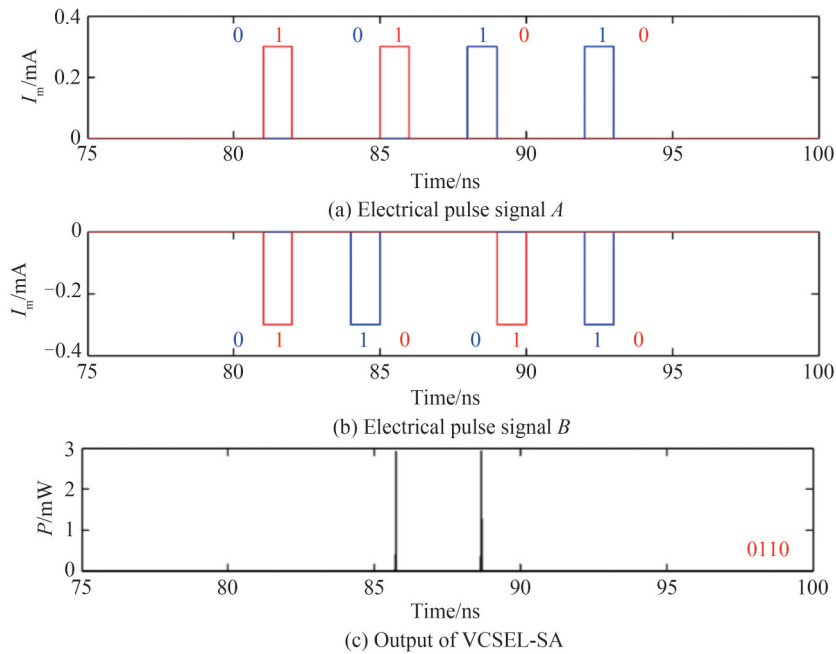


图 7 XOR 逻辑运算的实现

Fig. 7 Implementation of XOR logic operation

为了进一步探究光电逻辑门实现重构的优化工作参数范围,图 8 以逻辑门(NAND, NOR)为例给出了不同调制电流下 VCSEL-SA 输出的演变图谱,其中,  $I_a = 2.3$  mA,  $k_s = 3 \times 10^3$ , 光注入脉冲和电流调制信号的扰动时长分别为  $\Delta t_1 = 1$  ns,  $\Delta t_2 = 1$  ns。当两个电流调制信号(10)和(01)分别注入 VCSEL-SA, 且电流调制强度  $I_m$  小于 0.32 mA 时, spike 能够被激发,满足 NAND 的实现条件,而当电流调制强度  $I_m$  大于 0.32 mA 后, spike 不再被激发,满足 NOR 的实现条件,如图 8(a)所示。当两个相同模式(11)的电信号调制 VCSEL-SA, 且电流调制强度  $I_m$  大于 0.18 mA 时, VCSEL-SA 不能激发 spike 信号,满足 NAND 和 NOR 的实现条件。综合图 8(a)和(b)可以看出,当调制信号幅度  $I_m$  的取值范围在 0.18~0.32 mA 时, NAND 能够实现,当调制电流大小  $I_m$  大于 0.32 mA 时, NOR 能够实现。因此,对于给定的光注入 VCSEL-SA, 我们通过调节调制电流信号的幅度可以实现 NAND 和 NOR 逻辑运算功能的转换,即实现 NAND 和 NOR 逻辑门的重构。

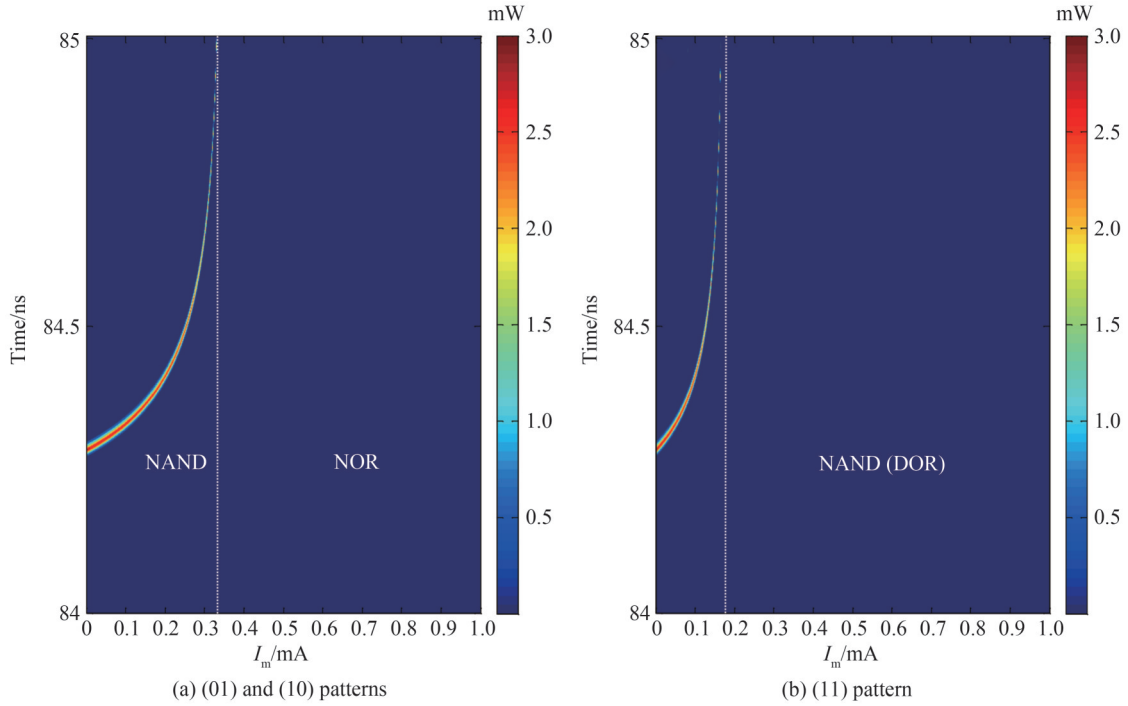
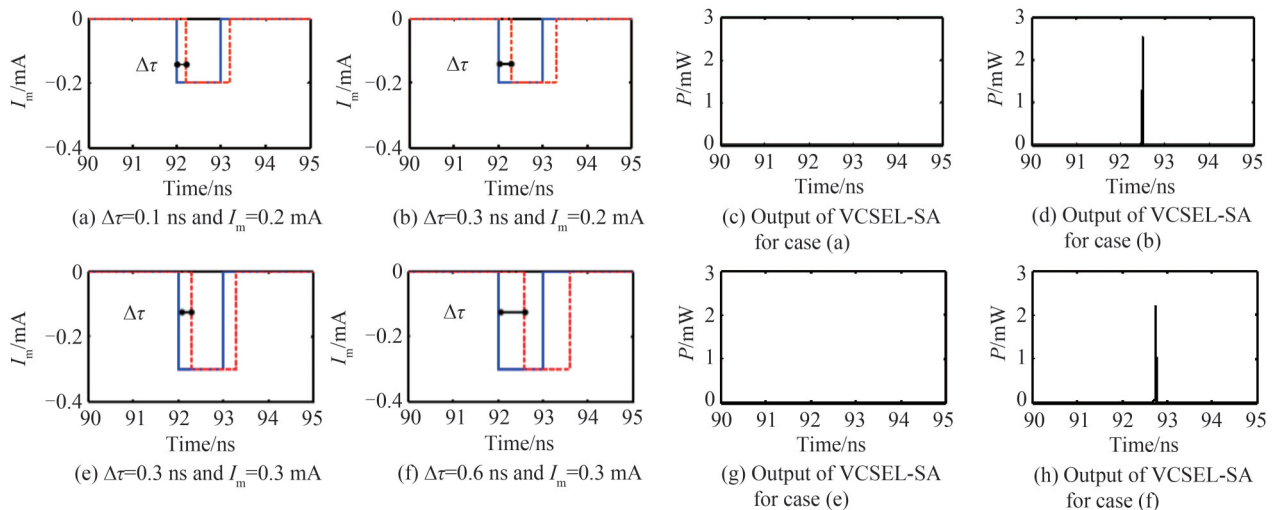


图 8 VCSEL-SA 的输出随调制幅度  $I_m$  变化的演变图  
 Fig. 8 Evolution of the VCSEL-SA's output with  $I_m$

图 9 进一步给出了两路调制电流信号的输入延时对光电逻辑门(NAND, NOR)的影响,这里只讨论了当两个调制信号输入非“0”信号的情况,即输入模式为 11。两路电信号均通过反相器反相,且第一个调制信号的下降沿到第二个调制信号的下降沿的时间距离为  $\Delta\tau$ 。图 9(c)~(d)和图 9(g)~(h)是 NAND 门运算的情况。当调制电流大小  $I_m = 0.2$  mA 时,随着  $\Delta\tau$  从 0 ns 逐渐增加,VCSEL-SA 开始无法激发 spike 信号,即可以实现 NAND 操作。当输入延时  $\Delta\tau$  达到 0.3 ns 时,VCSEL-SA 激发了 spike 信号,此时 NAND 逻辑操作失效,如图 9(d)所示,这主要是因为当输入的两路电信号的时延达到一定程度后,调制信号无法使 VCSEL-SA 有源区内的载流子累积的水平降低到阈值以下,因此 VCSEL-SA 仍然能激发一个 spike。当调制电流被增加到  $I_m = 0.3$  mA 时,类似的结果仍然可以被获得,如图 9(g)和(h)所示。图 9(k)~(l)和图 9(o)~(p)是 NOR 门运算的情况,调制电流幅度分别为 0.5 mA 和 1 mA。从图 9(i)~(p)可以看出,对于两个大小不同的调制信号,即使两路电信号的输入延时  $\Delta\tau$  大于调制信号的扰动时长  $\Delta t = 1$  ns, NOR 逻辑运算仍然可以实现。这主要是因为单路调制电流的幅度已经足够抑制激光器的 spike 输出,这与图 6(e)~(h)中 NOR 门运算的情况一致。由此可见,本文提出的可重构逻辑门在两路调制信号存在一定的输入延时也可实现 NAND 和





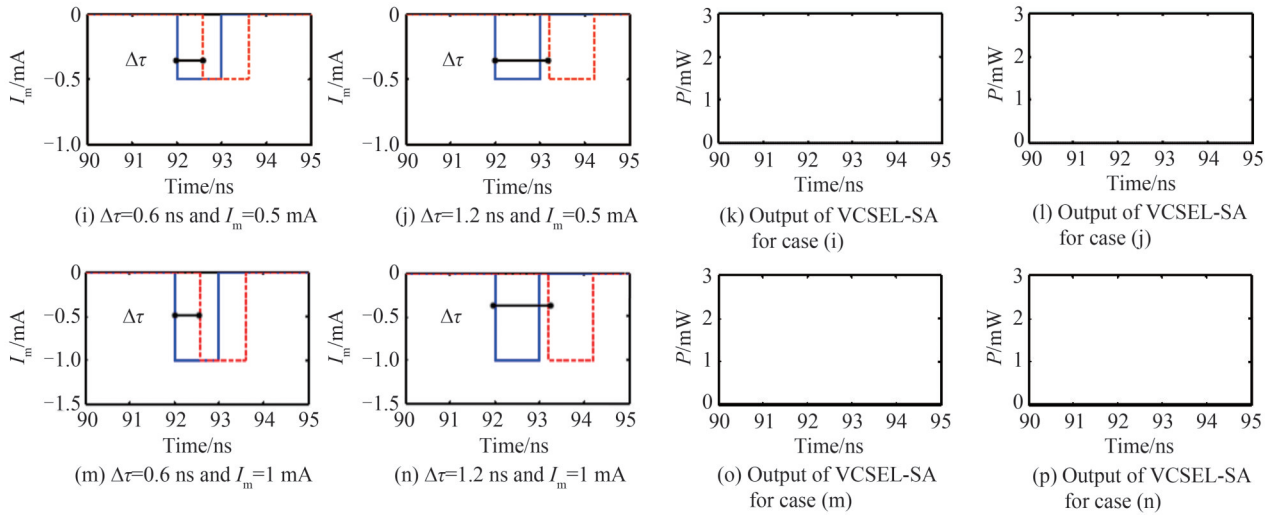


图9 两个电流调制信号之间的输入延时对光电逻辑门(NAND, NOR)的影响

Fig. 9 Influence of the input delay between two current modulation signals on the optoelectronic logic gate (NAND, NOR)

NOR逻辑运算。当调制信号幅度达到一定值后,信号间的输入延时对逻辑运算(NAND、NOR)的影响相对较小,这主要是因为大的调制信号注入可以使增益区的载流子浓度急速下降,能更加有效地抑制 VCSEL-SA 的 spike 激发,因而可以容许更大的输入延时范围。需要指出的是,实现逻辑运算所能容许的输入延时范围受探测光 O 的注入强度、偏置电流大小和调制电流大小的影响,因此,在实际的逻辑运算中,需要合理的设置光注入强度、VCSEL-SA 偏置电流、调制信号的幅度及两路调制信号之间的时延。

在逻辑电路的实际应用中,噪声不可避免地会对系统的性能产生影响。为了进一步分析噪声对本文提出的可重构逻辑运算电路的影响,图 10(a)~(c)和图 10(d)~(f)分别给出了信噪比 SNR 为 20 dB 和 10 dB

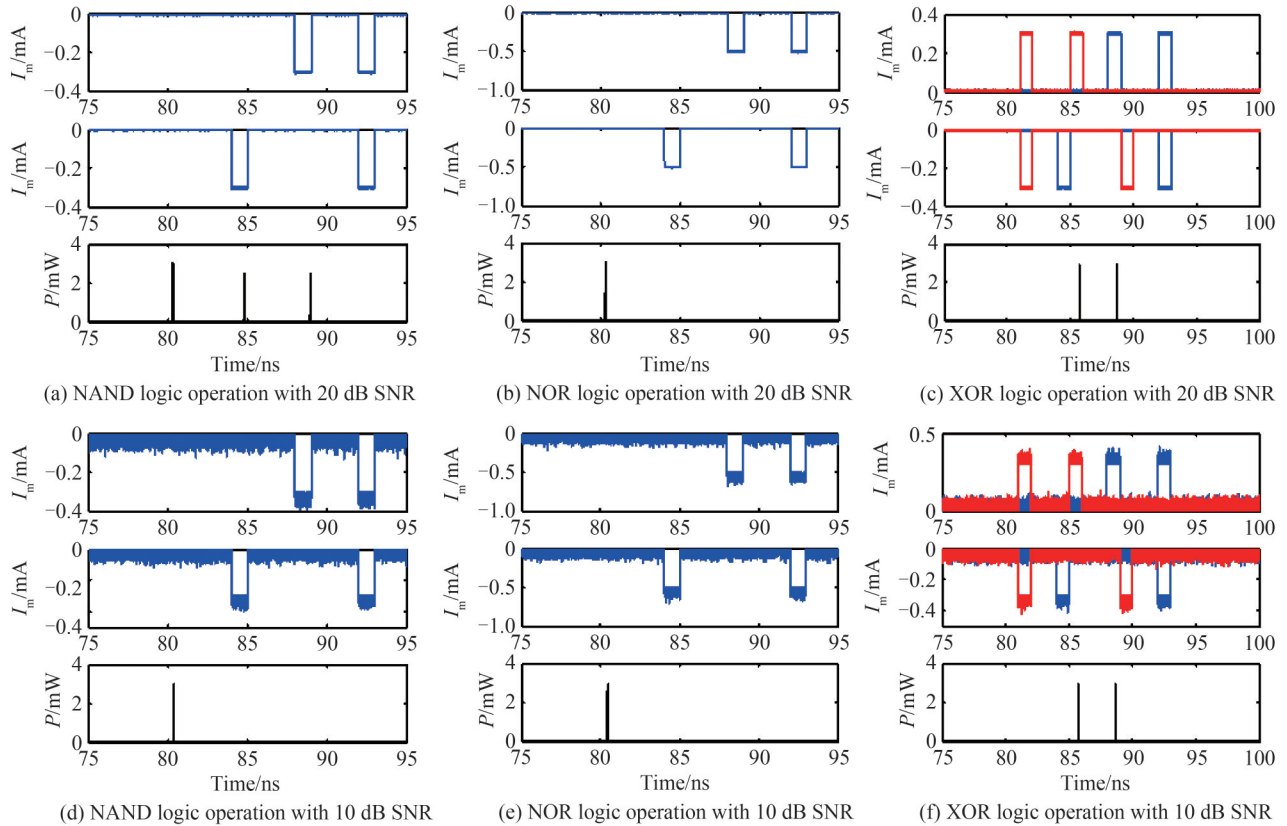


图10 噪声对光电逻辑门(NAND, NOR, XOR)实现的影响

Fig. 10 The effect of noise on the implementation of optoelectronic logic gates (NAND, NOR, XOR)

时,光电逻辑门(NAND, NOR, XOR)输出的结果,其中, $I_a = 2.3 \text{ mA}$ , $k_s = 3 \times 10^3$ ,光注入脉冲和电流调制信号的扰动时长均为 1 ns。当调制信号幅度  $I_m = 0.3 \text{ mA}$  时,对比图 10(a)和图 10(d),当信噪比从 20 dB 下降到 10 dB 时,NAND 的逻辑运算失效。图 10 (b)和(e)是调制信号幅度  $I_m$  为 0.5 mA 时,NOR 逻辑操作的输出情况,可以看出即使在较大的噪声影响下,NOR 门仍然可以实现。图 10 (c)和(f)是在调制信号幅度  $I_m = 0.3 \text{ mA}$  的条件下,XOR 的输出情况,蓝色实线是原信号,红色实线是补加的信号。从图中可以看出,较大的噪声下 XOR 逻辑运算仍然可以实现。显然,虽相对于 NAND 逻辑运算而言,NOR 和 XOR 逻辑运算对噪声的容忍性较好。由此可见,虽然噪声对逻辑门的运算性能有一定的影响,但本文提出的基于电流调制下光注入 VCSEL-SA 的逻辑电路对噪声有一定的容忍性。

### 3 结论

基于电流调制和光注入共同作用下带有饱和和吸收体的垂直腔面发射激光器(VCSEL-SA)的 spiking 动力学特性,提出了一种可重构的光电逻辑门(NOT, NAND, NOR, XOR)设计方案,并数值分析了系统的逻辑运算特性。结果表明,选取合适的调制电流大小可以实现 NAND 和 NOR 逻辑门的重构。两个电流调制信号之间的延时对光电逻辑门(NAND, NOR)的实现几乎没有影响。通过改变外部调制电流信号的输入方式并去掉光注入信号,可以实现 XOR 逻辑运算。此外,研究进一步证实,在一定的条件下,本文提出的基于 VCSEL-SA 的光电逻辑门对噪声具有一定的容忍性。本文所设计的逻辑运算电路有望对未来超高速、大带宽的光子神经网络应用于相关领域所需基本逻辑运算元器件的开发设计提供一定的理论基础。

#### 参考文献

- [1] PRUCNAL P R, SHASTRI B J, DE LIMA T F, et al. Recent progress in semiconductor excitable lasers for photonic spike processing[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2): 228-299.
- [2] PAMMI V A, TERRIEN S, BRODERICK N G R, et al. Short and long term memory in regenerative spiking micropillar lasers[C]. *CLEO/Europe-EQEC*, 2019.
- [3] PENG H T, ANGELATOS G, DE LIMA T F, et al. Temporal information processing with an integrated laser neuron [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(1): 5100209.
- [4] LIU Qi, LI Pu, KAI Chao, et al. Short-time prediction of chaotic laser using time-delayed photonic reservoir computing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(15): 154209.  
刘奇,李璞,开超,等.基于时延光子储备池计算的混沌激光短期预测[J]. *物理学报*, 2021, 70(15): 154209.
- [5] CAI Q, GUO Y, LI P, et al. Modulation format identification in fiber communications using single dynamical node-based photonic reservoir computing[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(1): B1-B8.
- [6] BRUNSTEIN M, YACOMOTTI A M, SAGNES I, et al. Excitability and self-pulsing in a photonic crystal nanocavity [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(3): 031803.
- [7] ROMEIRA B, FIGUEIREDO J M L, JAVALOYES J. Delay dynamics of neuromorphic optoelectronic nanoscale resonators: perspectives and applications[J]. *Chaos*, 2017, 27(11): 114323.
- [8] SHASTRI B J, NAHMIAS M A, TAIT A N, et al. Spike processing with a graphene excitable laser [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19126.
- [9] TOOLE R, TAIT A N, DE LIMA T F, et al. Photonic implementation of spike-timing-dependent plasticity and learning algorithms of biological neural systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 470-476.
- [10] TAIT A N, DE LIMA T F, ZHOU E, et al. Neuromorphic photonic networks using silicon photonic weight banks[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 7430.
- [11] ALEXANDER K, VAN VAERENBERGH T, FIERS M, et al. Excitability in optically injected microdisk lasers with phase controlled excitatory and inhibitory response[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26182-26191.
- [12] SELMI F, BRAIV R, BEAUDOIN G, et al. Spike latency and response properties of an excitable micropillar laser [J]. *Physical Review E*, 2016, 94(4): 042219.
- [13] COOMANS W, GELENS L, BERI S, et al. Solitary and coupled semiconductor ring lasers as optical spiking neurons [J]. *Physical Review E*, 2011, 84(3): 036209.
- [14] MEINECKE S, KLUGE L, HAUSEN J, et al. Optical feedback induced oscillation bursts in two-state quantum-dot lasers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3361-3377.
- [15] NAHMIAS M A, SHASTRI B J, TAIT A N, et al. A leaky integrate-and-fire laser neuron for ultrafast cognitive computing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(5): 1800212.

- [16] ZHANG L Y, PAN W, XIANG S Y, et al. Common-injection-induced isolated desynchronization in delay-coupled VCSELs networks with variable-polarization optical feedback[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3845-3848.
- [17] XIANG S Y, WEN A J, PAN W. Emulation of spiking response and spiking frequency property in VCSEL-based photonic neuron[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(5): 1504109.
- [18] JAYAPRASATH E, WU Z M, SIVAPRAKASAM S, et al. Observation of additional delayed-time in chaos synchronization of uni-directionally coupled VCSELs[J]. *Chaos*, 2019, 28(12): 123103.
- [19] DENG T, XIA G Q, WU Z M. Broadband chaos synchronization and communication based on mutually coupled VCSELs subject to a bandwidth-enhanced chaotic signal injection[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2014, 76(1): 399-407.
- [20] ROBERTSON J, DENG T, JAVALOYES J, et al. Controlled inhibition of spiking dynamics in VCSELs for neuromorphic photonics: theory and experiments[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1560-1563.
- [21] HE Yang, DENG Tao, QIU Haiying, et al. Nonlinear dynamics of optical injected VCSELs subject to optoelectronic feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 0114002.  
何洋, 邓涛, 邱海英, 等. 光电反馈下光注入 VCSELs 的动力学特性[J]. *光子学报*, 2016, 45(1): 0114002.
- [22] YANG Xin, CHEN Jianjun, WU Zhengmao, et al. Nonlinear dynamics of 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers subject to negative optoelectronic feedback[J]. 2016, 45(8): 0814004.  
杨欣, 陈建军, 吴正茂, 等. 光电负反馈下 1 550 nm 垂直腔面发射激光器的动力学特性[J]. *光子学报*, 2016, 45(8): 0814004.
- [23] ROBERTSON J, KIRKLAND P, ALANIS J A. Ultrafast neuromorphic photonic image processing with a VCSEL neuron[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 4874.
- [24] ZHANG Z X, WU Z M, LU D, et al. Controllable spiking dynamics in cascaded VCSEL-SA photonic neurons[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 99(2): 1103-1114.
- [25] ZHANG Y H, XIANG S Y, GONG J K, et al. Spike encoding and storage properties in mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers subject to optical pulse injection[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1731-1737.
- [26] NI M, LIN X D, TANG X, et al. Image transmission based on spiking dynamics of electrically controlled VCSEL-SA neuron[J]. *Photonics*, 2021, 8(7): 238.
- [27] GAO S, XIANG S Y, SONG Z W, et al. All-optical Sudoku solver with photonic spiking neural network[J]. *Optics Communications*, 2021, 495: 127068.
- [28] BOGONI A, POTI L, GHELFI P, et al. OTDM-based optical communications networks at 160 Gbit/s and beyond[J]. *Optical Fiber Technology*, 2007, 13(1): 1-12.
- [29] PERRONE S, VILASECA R, MASOLLER C. Stochastic logic gate that exploits noise and polarization bistability in an optically injected VCSEL[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22692-22699.
- [30] XU Geliang, ChengDA, NI Qianlong, et al. Reconfigurable optoelectronic chaotic logic gates in vertical cavity surface emitting laser with optical feedback[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 253-262.  
许葛亮, 笪诚, 倪乾龙, 等. 光反馈垂直腔面发射激光器的可重构光电混沌逻辑门[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 253-262.
- [31] ZHONG D Z, LUO W, XU G L, et al. Optoelectronic composite logic gates controlled by the logic operation in a VCSEL with external optical injection[J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2016, 26(12): 1650210.
- [32] XIANG S Y, REN Z X, ZHANG Y H, et al. All-optics neuromorphic XOR operation with inhibitory dynamics of a single photonic spiking neuron based on a VCSEL-SA[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1104-1107.
- [33] XIANG S Y, REN Z X, ZHANG Y H, et al. Training a multi-layer photonic spiking neural network with modified supervised learning algorithm based on photonic STDP[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 27(2): 7500109.
- [34] OLEJNICZAK L, PANAJOTOV K, THIENPONT H, et al. Self-pulsations and excitability in optically injected quantum-dot lasers: Impact of the excited states and spontaneous emission noise[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(2): 2498-2498.
- [35] NUGENT D G H, PLUMB R G S, FISHER M A, et al. Self-pulsations in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(1): 43-44.
- [36] XIANG S Y, REN Z X, ZHANG Y H, et al. Training a multi-layer photonic spiking neural network with modified supervised learning algorithm based on photonic STDP[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 27(2): 7500109.
- [37] SHASTRI B J, NAHMIA S M A, TAIT A N, et al. SIMPEL: Circuit model for photonic spike processing laser neurons [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 8029-8044.
- [38] HURTADO A, SCHIRES K, HENNING I D, et al. Investigation of vertical cavity surface emitting laser dynamics for neuromorphic photonic systems[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 103703.

## Reconfigurable Logic Operation Based on Optically Injected VCSEL-SA Subject to Current Modulation

XIAO Luyao<sup>1,2</sup>, TANG Xi<sup>1,2</sup>, LIN Xiaodong<sup>1,2</sup>, GAO Ziyi<sup>1,2</sup>, DUAN Zhifei<sup>1,2</sup>, DU Xiaorui<sup>1,2</sup>,  
XIA Guangqiong<sup>1,2</sup>, WU Zhengmao<sup>1,2</sup>, DENG Tao<sup>1,2</sup>

(1 School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 Chongqing Key Laboratory of Micro & Nano Structure Optoelectronics, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** With the rapid development of society, modern technologies such as artificial intelligence, the Internet, multimedia, 5G communication, and big data services have been widely used in national production and daily life. Moreover, the demand for computing power in the whole society is increasing at a rate of at least 20% every year, which brings unprecedented challenges to the computing power of present computing systems. At present, the traditional Von Neumann architecture based on the separation of storage and computing has encountered bottlenecks including storage, computing speed, power consumption, etc. In addition, Moore's Law has also encountered bottlenecks due to the limitations of CMOS technology, and the development of integrated circuits has entered into a post-Moore era. Consequently, the research and development of artificial neural networks have attracted much attention, and photonic neural networks based on silicon-based electronic devices or optical devices have become the focus issue. Photonic neural networks can overcome the limitations of the von Neumann architecture and have the advantages of low power consumption and high speed when dealing with complex artificial intelligence tasks, which can provide a new feasible solution for solving complex problems such as decision-making, deep learning and optimization, pattern recognition, and perceptual information processing. In recent years, photonic neural networks have become a research hotspot due to their obvious advantages over traditional electronic methods in terms of speed and energy efficiency. As a result, neuromorphic photonic devices have attracted extensive attention. Amongst of them, semiconductor lasers have become an ideal artificial neuron due to similar response behavior to biological neuron and ultrafast response speed. In particular, VCSELs possess these advantages of small size, low power consumption, low cost, and high coupling efficiency with optical fibers. Therefore, exploring the nonlinear dynamic behaviors of VCSEL and their applications in these fields related to neuromorphic computing is expected to promote innovative development in the field of artificial intelligence. Recently, the spiking dynamics of VCSEL photonic neurons under external stimuli has been reported theoretically and experimentally. It is worth noting that introducing an extra Saturable Absorber (SA) into VCSEL can constitute an integrated two-section excitable laser (VCSEL-SA). Compared with the traditional photonic neuron model, this integrated photonic neuron can be used as a LIF model. Moreover, the spatiotemporal information can be encoded in the output spike signals of VCSEL-SA and the characteristics of biological neurons can be better simulated. In addition, VCSEL-SA can excite a shorter sub-nanosecond light pulse and its excitation threshold can also be flexibly controlled within a certain range. Therefore, the research and application of VCSEL-SA in the related fields of photonic neural network has become increasingly important.

At present, optoelectronic hybrid information processing technology is still an important development direction for the future information technology field. Optoelectronic logic gate, as a key functional element in an optoelectronic hybrid system, can be applied to functional modules such as payload coding, parity checking, generation of ultra-high-speed pseudo-random sequences, and optical computing. So far, logic operation based on optoelectronic method has been realized. However, the traditional scheme usually has some disadvantages such as complex structure, multi-step or requiring relatively high power. Combining the cost efficiency of reconfigurable logic devices for future large-scale integration and unique advantages of VCSEL-SA, the optoelectronic logic gate based on VCSEL-SA can open a new path for future optoelectronic hybrid processing platform. In this paper, we propose a reconfigurable optoelectronic logic gate (NOT, NAND, NOR, XOR) based on the VCSEL-SA under the combined action of current modulation and optical injection, then the spiking dynamics of VCSEL-SA under current modulation are numerically studied, and the logic operation performance of VCSEL-SA is realized by the combined action of current modulation and optical injection. The research results show that, for the optical injection VCSEL-SA under current modulation, the optoelectronic logic gate can be realized within a certain bias

current range. By selecting an appropriate modulation current, reconfigurable logic operations (NAND, NOR) can be realized, and the time delay between the two modulation signals has little effect on its performance. By changing the input mode of the current modulation signal and removing the optical injection signal, the VCSEL-SA can realize the XOR logic operation. In addition, the reconfigurable logic operation based on VCSEL-SA has good robustness to noise. These research results can provide a certain theoretical basis for future neuromorphic photonic networks to solve complex tasks.

**Key words:** Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with Saturated Absorber (VCSEL-SA); Spiking dynamic characteristics; Current modulation; Reconfigurability; Optoelectronic logic gate

**OCIS Codes:** 140.7260; 250.7260; 190.4360; 200.4660