

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2018.09.013

VCSEL 光子神经 Spiking 动力学的抑制特性研究^①

李 硕, 马绍玲, 王之靖, 邓 涛

西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要: 理论研究了外部扰动信号的强度和持续时间对 1 300 nm-VCSEL 光子神经 spiking 动力学抑制特性的影响。研究表明: VCSEL 在适当的外部连续光注入下可工作在重复频率为亚纳秒级的连续 spiking 区; 在引入外部扰动信号后, 对于较小的扰动信号强度, VCSEL 的 spiking 动力学抑制特性不受影响。随着扰动信号强度的增加, VCSEL 在扰动信号作用区可激发出重复频率更低的 spikes 信号。当扰动信号强度达到一定水平后, VCSEL 在扰动信号作用区激发的 spikes 信号可被有效抑制。此外, 被抑制的 spikes 信号区与外部扰动信号的持续时间基本一致。对于一定的扰动信号强度和持续时间, VCSEL 激发的 spikes 信号在扰动信号作用范围可被完全抑制。

关键词: 1 300 nm-VCSEL; 光子神经; 扰动信号; spiking 动力学; 抑制

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)09-0079-07

人工神经网络因在模式识别、信号处理和仿神经计算等领域的巨大应用价值而受到广泛的关注^[1-3]。传统的人工神经网络主要基于电学方式实现^[3-6]。目前, 欧美等国家在这一领域已经取得了一系列具有里程碑意义的重大成果, 如斯坦福的 Neurogrid^[7]、IBM 的 TrueNorth^[8]、海德堡大学的 HICANN^[9]等。尽管如此, 基于电学方式的仿神经系统因受到系统带宽、能耗和组网成本等众多因素的限制而影响了其应用范围^[10]。

近年来, 基于光学方式的神经元模型已经成为了研究的热点, 基于光纤激光器^[11]、光子晶体^[12]和半导体激光器^[10]等的不同仿神经光子模型先后被提出, 其相应的全无响应^[10]、在外部刺激下的 spikes 信号激发^[13]和抑制^[14]、外部光注入下的不应期^[15]等特性已经被理论或实验证实。特别的是, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)相比于普通的边发射激光器具有低成本、低能耗、易于集成到二维阵列、与光纤高的耦合效率等一些独特的优势, 因而成为了仿神经光子模型和网络的理想器件^[16-17]。2010 年, HURTADO 等基于 1 550 nm-VCSEL 的偏振转换实验证实了 VCSEL 光子神经的可行性^[18]。随后, ROBERTSON 等实验实现了外部扰动信号对 VCSEL 光子神经激发的 spikes 信号的控制, 并利用光注入下的 Ginzburg-Landau 方程理论证实了上述结果^[19]。就 VCSELs 而言, 自旋反转模型已经被广泛应用于 VCSELs 的非线性动力学研究^[20-22]。最近, 文献[23]基于 VCSEL 的自旋反转模型, 理论证实了通过调节外

① 收稿日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61674123); 重庆市自然科学基金项目(2016jcyjA0082); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201710635020)。

作者简介: 李 硕(1998-), 男, 大学本科学生, 主要从事半导体激光动力学研究。

通信作者: 邓 涛, 教授。

部扰动信号,可在一定程度上对 VCSEL 光子神经激发的 spikes 信号的数目及频率实现控制.本研究进一步理论研究了外部扰动信号的强度和持续时间对 VCSEL 光子神经 spiking 动力学抑制特性的影响.

1 理论模型

基于 VCSEL 的自旋反转模型 (spin flip model, SFM),描述光注入下 VCSEL 光子神经 spiking 动力学行为的速率方程可以表示为^[20]:

$$\frac{dE_{x,y}}{dt} = -(k \pm \gamma_a)E_{x,y} - i(ka \pm \gamma_p)E_{x,y} + k(1 + ia)(NE_{x,y} \pm inE_{y,x}) + \eta_1 E_{inj,x,inj,y}(t) e^{i\Delta\omega_{x,y}t} + F_{x,y} \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\gamma_e[N(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) - \mu + in(E_y E_x^* - E_x E_y^*)] \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_s n - \gamma_e[n(|E_x|^2 + |E_y|^2) + iN(E_y E_x^* - E_x E_y^*)] \quad (3)$$

式中:下标 x 和 y 分别代表 VCSEL 的 X 偏振分量(x -PC, 正交分量)和 Y 偏振分量(y -PC, 平行分量); E 表示 VCSEL 输出场的慢变复振幅; $E_{inj,x}$ ($E_{inj,y}$) 表示注入到 X-PC(Y-PC)的光场的慢变复振幅; N 表示 VCSEL 导带和价带之间总的反转载流子密度; n 表示自旋向上和自旋向下能级对应的载流子密度之差; k 表示光场的衰减率; a 表示线宽增强因子; γ_e 表示总载流子衰减速率; γ_s 表示自旋反转速率; γ_a 表示线性色散效应; γ_p 表示有源介质的双折射效应; μ 表示归一化的注入电流; $\Delta\omega_x$ ($\Delta\omega_y$) 为 X-PC 和 Y-PC 中心频率与外部注入光 $\omega_{inj,x}$ ($\omega_{inj,y}$) 的角频率差,即 $\Delta\omega_x = \omega_{inj,x} - (\omega_x^T + \omega_y^T)/2$ ($\Delta\omega_y = \omega_{inj,y} - (\omega_x^T + \omega_y^T)/2$); η_1 表示外部光注入到 VCSEL 的注入强度; F 表示朗之万白噪声,可以表示为:

$$F_x = \sqrt{\frac{\beta_{sp}\gamma_e}{2}}(\sqrt{N+n\xi_1} + \sqrt{N-n\xi_2}) \quad (4)$$

$$F_y = -i\sqrt{\frac{\beta_{sp}\gamma_e}{2}}(\sqrt{N+n\xi_1} + \sqrt{N-n\xi_2}) \quad (5)$$

式中: β_{sp} 代表自发辐射速率; ξ 代表高斯白噪声,其平均值为 0,方差为 1.

2 结果与讨论

利用四阶龙格库塔法对速率方程(1)–(5)进行数值求解.数值模拟过程中所采用的参量为^[18–20]: $\alpha = 2$, $k = 250 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_e = 1 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s = 200 \text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a = 2 \text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp} = 10^{-6}$, $\gamma_p = 128 \text{ ns}^{-1}$, $\Delta\omega_x = 22.3 \text{ GHz}$, $\eta_1 = 125 \text{ ns}^{-1}$, 激光器的中心频率为 $1.45 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ (对应的中心波长为 1300 nm).

本研究采用正脉冲作为扰动信号,并通过调制器调制到外部注入的连续光(图 1(a1)),加入扰动信号后的外部注入光见图 1(b1),其中 K_{inj} 代表连续注入光的强度, K 代表扰动信号强度, $K_p = K/K_{inj}$ 代表扰动信号的相对注入强度,单个扰动信号的持续时间用 t_d 表示.需要说明的是,本研究仅仅考虑了正交光注入的情况.在 $E_{inj,x} = 0.056$ 的连续光注入下,系统工作在连续的 Spiking 态(图 1(a2)).当在连续光中加入 $t_d = 3 \text{ ns}$, $K_p = 0.54$ 的扰动信号后,由于外部光注入强度突然增加,使得激光器在外部扰动信号到来后进入注入锁定态,其激发的 spikes 信号被相应抑制(图 1(b2)).随后,激光器在扰动信号消失后从注入锁定态回到连续的 spiking 态,从而呈现出连续的 spikes 信号.为了进一步说明外部扰动信号对系统产生的持续影响,图 1(b3)给出了在 100 个连续外部扰动信号下激光器输出的演化图,其中扰动信号的速率为 $f_{rep} = 10 \text{ MHz}$;从黑到白的不同颜色代表激光器输出信号的强度,其中灰(灰黑对应激光器的稳态输出,白色代表 spikes 信号.从图 1(b3)可以看出,对于连续的外部扰动信号,激光器输出的 spikes 信号可被有效地抑制,即 VCSEL 光子神经这种 spiking 动力学的抑制具有可重复性.

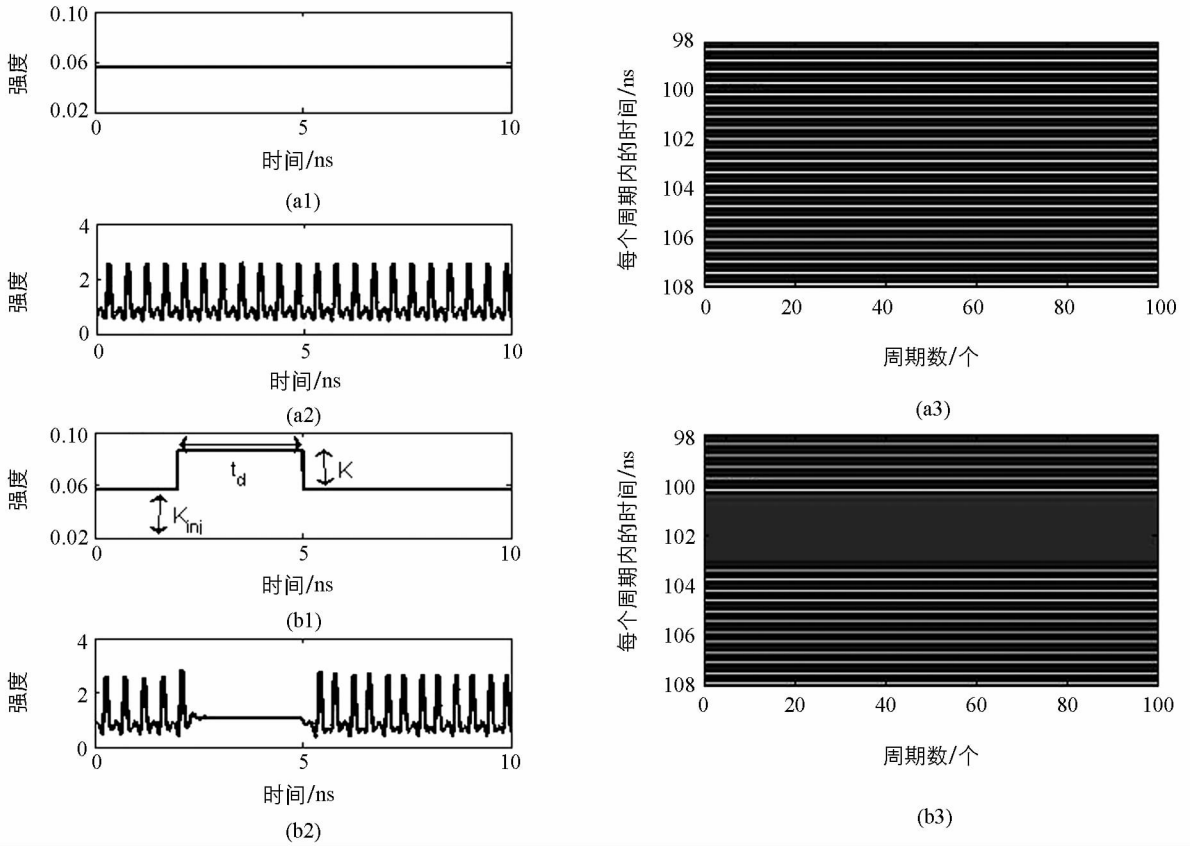


图 1 外部注入信号、激光器的 spike 信号响应及相应的演化图

图 2 给出了扰动信号持续时间 $t_d = 5$ ns 时, 扰动信号的强度对 VCSEL 光子神经 spiking 动力学抑制的影响. 当 $K_p = 0$ 时, 激光器仅仅受到连续的外部光注入, 此时激光器处于连续的 spiking 工作区(图 2(a2)). 当扰动信号增加到 $K_p = 0.18$ 时, 激光器仍然输出连续的 spikes 信号, 但在外部扰动信号作用的区域, spikes 信号的幅度变得更大, 且其振动周期变大(图 2(b2)). 当继续增加扰动信号到 $K_p = 0.36$ 时, 激光器输出与图 2(b2)所示的连续 spikes 信号类似, 但在扰动信号作用的区域, spikes 信号的振动周期进一步加大. 当扰动信号强度增加到 $K_p = 0.50$ 时, 外部扰动信号的强度达到了抑制 spikes 信号的阈值, 因而在扰动信号作用区, 激光器激发的 spikes 信号完全被抑制(图 2(d2)). 此外, 图 2(a3)–(d3)给出上述扰动强度下激光器受到连续 100 个外部扰动信号刺激后的响应. 从图 2 中可以看出, 激光器在多个相同外部扰动信号的刺激下可获得相同的响应, 从而进一步证实了外部刺激下 VCSEL 光子神经这种 spiking 动力学的抑制行为具有可重复性. 这些结果与 ROBERTSON 等报道的实验结果基本一致^[16], 从而在一定程度上证实了利用 SFM 模型模拟分析 VCSEL 光子神经 spiking 动力学抑制特性的可行性.

图 3 给出了扰动信号强度 $K_p = 0.50$ 时, 扰动信号的持续时间 t_d 对 VCSEL 光子神经 spiking 动力学抑制的影响. 其中图 3(a1)–(d1)为不同持续时间的扰动信号, 图 3(a2)–(d2)为不同扰动信号持续时间下激光器输出时间序列, 图 3(a3)–(d3)为相应的演化图. 从图 3 中可以看出, 对于足够的扰动信号强度(超过 spiking 动力学抑制的阈值), 当 t_d 从 1 ns 到 5 ns 之间变化时, 在所有的扰动信号作用区, 激光器激发的 spikes 信号可被有效地抑制. 综合图 2 和图 3, 可以通过控制扰动信号的强度和持续时间有效地抑制激光器激发的 spikes 信号.

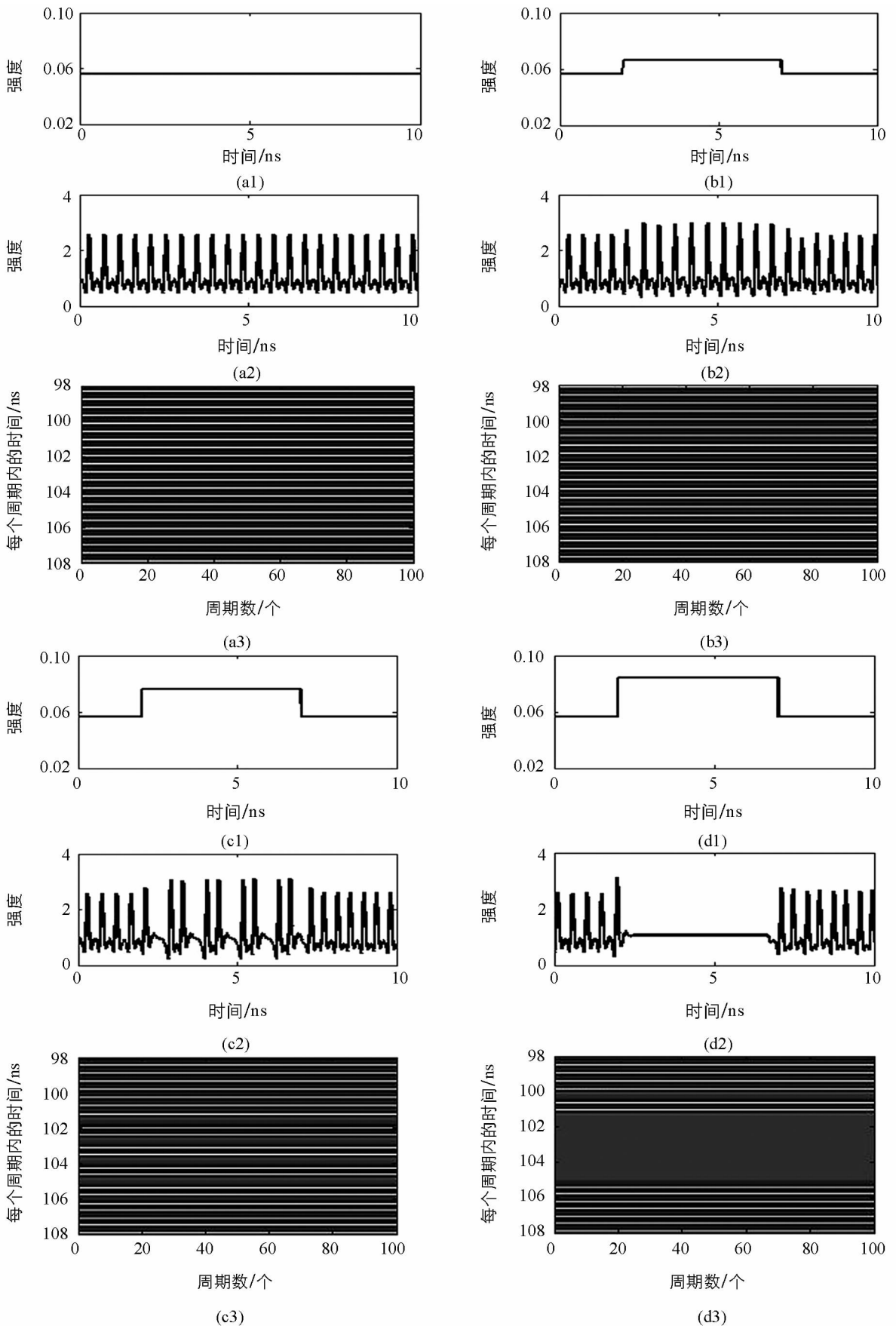


图 2 不同扰动信号强度下 VCSEL 输出的时间序列和相应的演化图

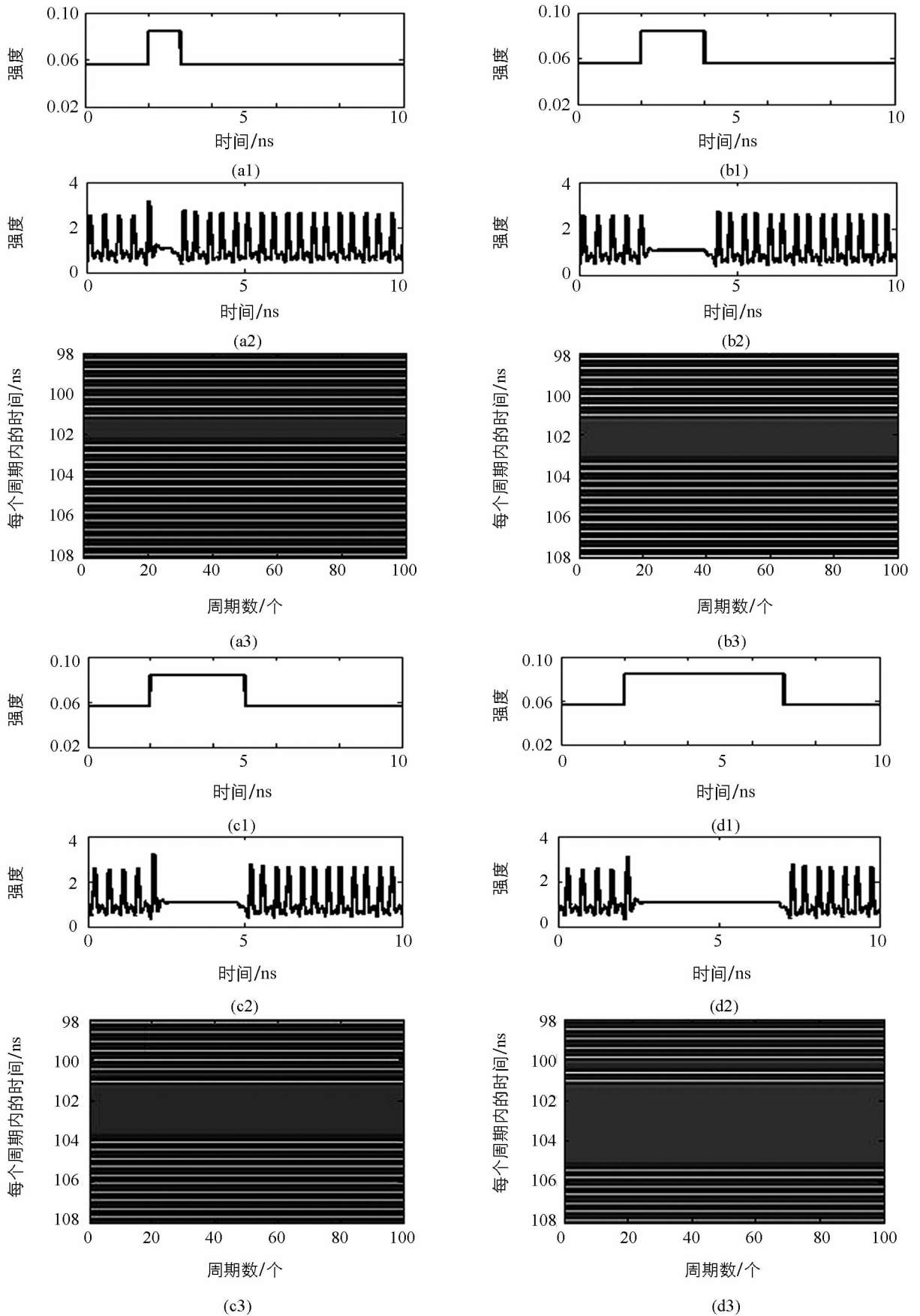


图 3 不同扰动信号持续时间下 VCSEL 输出的时间序列和相应的演化图

3 结 论

基于光注入下 1 300 nm-VCSEL, 采用 SFM 模型理论研究了扰动信号强度和持续时间对 1 300 nm-VCSEL 光子神经 spiking 动力学抑制特性的影响. 研究表明: 在适当的外部注入信号下, VCSEL 光子神经能激发出亚纳秒级稳定、可重复的 spikes 信号; 外部扰动信号的强度和持续时间对 VCSEL 光子神经的 spiking 动力学的抑制特性有较大的影响, 当扰动信号的强度超过一定水平后, VCSEL 激发的 spikes 信号可在扰动信号持续时间内完全被抑制. 这些结果为基于 1 300 nm-VCSEL 的光子神经模型及其网络的建立提供了一定的理论支撑.

参考文献:

- [1] SWIGERT C J. Pattern Identification by Spatial Filtering in A Neuron Network Model [J]. *International J Neurosci*, 1971, 2(6): 249–264.
- [2] MASSON G L, PRZEDBORSKI S, ABBOTT L F, A Computational Model of Motor Neuron Degeneration [J]. *Neuron*, 2014, 83(4): 975–988.
- [3] INDIVERI G, LINARES-BARRANCO B, HAMILTON T J, et al. Neuromorphic Silicon Neuron Circuits [J]. *Front Neurosci*, 2011, 5(5): 00073–1–00073–23.
- [4] WU X Y, SAXENA V, ZHU K H, et al. A CMOS Spiking Neuron for Brain-Inspired Neural Networks with Resistive Synapses and In-Situ Learning [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs*, 2015, 62(11): 1088–1092.
- [5] IMAM N, ARTHUR J, MERROLLA P, et al. A Digital Neurosynaptic Core Using Event-Driven QDI Circuits [J]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2012(1): 25–32.
- [6] INDIVERIG, CHICCAE, DOUGLAS R. A VLSI Array of Low-Power Spiking Neurons and Bistable Synapses with Spike-Timing Dependent Plasticity [J]. *IEEE Trans. Neural Netw*, 2006, 17(1): 211–221.
- [7] BENJAMIN B V, GAO P, MCQUINN E. Neurogrid: A Mixed-Analog-Digital Multichip System for Large-Scale Neural Simulations [J]. *Proc. IEEE*, 2014, 102(5): 699–716.
- [8] HSU J. IBM's New Brain [J]. *IEEE Spect*, 2014, 51(10): 17–19.
- [9] SCHEMMELE J, BRÜDERLE D, GRÜBL A, et al. A Water-Scale Neuromorphic Hardware System for Large-Scale Neural Modeling [J]. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2010(1): 1947–1950.
- [10] PRUCNAL P R, SHASTRI B J, LIMA T F, et al. Recent Progress in Semiconductor Excitable Lasers for Photonic Spike Processing [J]. *Advances in Optics and Photon*, 2016, 8(2): 228–299.
- [11] SHASTRI B J, NAHMIA S M A, TAIT A N, et al. Simpel: Circuit Model for Photonic Spike Processing Laser Neurons [J]. *Opt Express*, 2015, 23(6): 8029–8044.
- [12] BRUNSTEIN M, YACOMOTTI A M, SAGNES I, et al. Excitability and Self-Pulsing in a Photonic Crystal Nanocavity [J]. *Phys Rev A*, 2012, 85(3): 031803–1–031803–7.
- [13] HURTADO A, JAVALOYES J. Controllable Spiking Patterns in Long-Wavelength Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for Neuromorphic Photonics Systems [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 107(24): 241103–1–241103–5.
- [14] IZHIVKOVICH E M, Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? [J]. *IEEE Trans Neural Netw*, 2004, 15(5): 1063–1070.
- [15] GARBIN B, DOLCEMASCOLO A, PRATI F, et al. Refractory Period of An Excitable Semiconductor Laser with Optical Injection [J]. *Phys Rev E*, 2017, 95(1): 012214–1–012214–5.
- [16] KOYAMA F. Recent Advances of VCSEL Photonics [J]. *IEEE J Lightw Technol*, 2007, 24(12): 4502–4513.
- [17] 何 秀, 熊中碧, 林晓东, 等. 光注入下 VCSEL 在阈值附近的非线性响应特性 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2017, 39(3): 170–175.
- [18] HURTADO A, HENNING I D, ADAMS M J. Optical Neuron Using Polarisation Switching in a 1 550 nm-VCSEL [J]. *Opt Express*, 2010, 18(24): 25170–25176.

- [19] ROBERTSON J, DENG T, JAVALOYES J, et al. Controlled Inhibition of Spiking Dynamics in VCSELs for Neuromorphic Photonics; Theory and Experiments [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(8): 1560–1563.
- [20] 操良平, 董晓云, 梁兴连, 等. 偏振改变光反馈垂直腔面发射激光混沌系统时延特征的隐藏 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(7): 149–155.
- [21] AL-SEYAB R, SCHIRES K, KHAN N A, et al. Dynamics of Polarized Optical Injection in 1 550 nm VCSELs; Theory and Experiments [J]. *IEEE J Sel Top in Quantum Electron*, 2011, 17(5): 1242–1249.
- [22] JIANG B, WU Z M, DENG T, et al. Polarization Switching Characteristics of 1 550 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Subject to Double Polarization Pulsed Injection [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2016, 52(11): 2400707–1–2400707–10.
- [23] DENG T, ROBERTSON J, HURTADO A. Controlled Propagation of Spiking Dynamics in Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers; Towards Neuromorphic Photonic Networks [J]. *IEEE J Sel Top in Quantum Electron*, 2017, 23(6): 1800408–1–1800408–8.

Investigation of the Inhibited Characteristics of Spiking Dynamics of VCSEL Photonic Neuron

LI Shuo, MA Shao-ling, WANG Zhi-jing, DENG Tao

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

Abstract: The influence of the strength and duration of perturbation on the inhibition characteristics of spiking dynamics of 1 300 nm-VCSEL photonic neuron is theoretically investigated. The results show that VCSEL photonic neuron subject to suitable external continuous optical injection can operate at tonic spiking regime with a sub-nanosecond repetition rate. After introducing external perturbation to the continuous injection light, for relatively small perturbation strength, the spiking dynamics of VCSEL photonic neuron can remain unaffected. With increasing perturbation strength, VCSEL can fire some spikes with lower repetition rate during the entire perturbation time. Once the strength of perturbation exceeds a certain level, the spikes fired by VCSEL during the entire perturbation time can be completely suppressed. Moreover, the suppressed spikes region coincides with the perturbation duration. For a certain perturbation strength and duration, the spikes fired by VCSEL can be completely suppressed during the entire perturbation time.

Key words: 1 300 nm-VCSEL; photonic neuron; perturbation; spiking dynamics; inhibition

责任编辑 潘春燕