

# 偏振保持光反馈下 1550 nm 垂直腔面发射激光器的非线性动力学特性研究\*

郑安杰 吴正茂 邓涛 李小坚 夏光琼†

(西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715)

(2012 年 4 月 15 日收到; 2012 年 5 月 17 日收到修改稿)

基于自旋反转模型, 研究了 1550 nm 垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 在偏振保持光反馈下的非线性动力学特性. 结果表明: 自由运行的 1550 nm-VCSELs 在电流增加的过程中, 发生偏振转换所对应的电流值与内部参数的取值有关, 随着有源介质线性色散效应系数  $\gamma_a$  的增大, 偏振开关的转换点所对应的电流值将增加; 偏振保持光反馈的引入将导致 1550 nm-VCSELs 中自由运行时的主导模 ( $Y$  偏振模式) 在不同电流下呈现不同动力学状态, 引起另外一个模式 ( $X$  模式) 激射, 两个模式的平均输出功率随电流的增加总体呈现增加的趋势, 但伴随着起伏; 反馈时间取不同值时, 1550 nm-VCSELs 的输出随着反馈强度的增大经历倍周期、准周期或阵发混沌等多种通向混沌的演化途径.

**关键词:** 1550 nm 垂直腔面发射激光器, 非线性动力学, 偏振保持, 光反馈

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.Sf

## 1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 相对于常规的边发射半导体激光器 (EELs) 而言具有体积小、阈值电流低、发散角小、可单纵模光输出、易与光纤耦合、易集成等优点<sup>[1-4]</sup>, 在光通信、光互联和光存储等领域具有广阔的应用前景.

不同于边发射激光器, VCSELs 的有源区或腔存在微弱的各向异性导致其可能存在两个正交偏振模式. 通过改变 VCSLEs 的工作参量可出现偏振模式的突然跳变从而使原被抑制模式转变为主导模式, 同时原主导模式被抑制, 这种现象被称为偏振开关 (PS). 与自由运行情况相比, VCSELs 固有的双偏振模式特性将使其在光反馈作用下呈现更为复杂的非线性动力学特性. 关于 VCSLEs 在光反馈作用下的非线性动力学行为已有一些理论和实验报道<sup>[5-11]</sup>. 如 Kuksenkov 和 Temkin<sup>[5]</sup> 报道了  $T$  型外腔 VCSELs 的偏振特性; Sciamanna 等<sup>[6]</sup>

实验和理论分析了光反馈可以引起 VCSELs 的两个正交线偏振模式发生反相关跳跃; Li 等<sup>[7]</sup> 研究了 VCSELs 在偏振选择光反馈作用下的非线性动力学特性. 目前的相关研究状况, 关于 VCSELs 在光反馈作用下的动力学特性大多集中在激射波长小于  $1 \mu\text{m}$  的短波长 VCSELs, 而对于激射波长位于  $1.3\text{--}1.55 \mu\text{m}$  的长波长 VCSELs 在光反馈作用下的非线性动力学特性的研究还十分匮乏.

由于 1550 nm-VCSELs 的激射波长位于光纤的低损窗口, 同时其具有易于实现二维面阵输出的特点, 因此其在信息的长距离、并行传输领域具有应用前景广阔. 近年来, 随着长波长 VCSELs 生产工艺的不断改善, 1550 nm-VCSELs 的性能正逐步得到提高, 因此在现阶段对 1550 nm-VCSELs 的非线性动力学特性开展相关研究就显得很有必要. 最近, Al-Seyab 等<sup>[12]</sup> 利用改进的自旋反转模型对 1550 nm-VCSELs 在任意角度偏振光注入下的动力学特性进行了数值仿真研究, 并通过与实验结果相比较, 确定了 1550 nm-VCSELs 的内部参数值. 本

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60978003, 61078003, 61178011, 61275116) 和重庆市自然科学基金重点项目 (批准号: CSTC2012jjB40011) 资助的课题.

† E-mail: gqxia@swu.edu.cn

文基于文献 [12] 所给出的 1550 nm-VCSELs 内部参数值, 对偏振保持光反馈作用下 1550 nm-VCSELs 的非线性动力学特性进行研究.

## 2 理论模型

图 1 为偏振保持光反馈下 1550 nm-VCSEL 的系统结构示意图. 1550 nm-VCSEL 输出的光通过准直透镜 L 准直后被分束器 (BS) 分成两路, 其中一路经过外腔反馈镜 (M1) 反射回激光器, 中性密度衰减片 (NDF) 被用来调节反馈量; 另一路则通过一个半波片 (HWP) 和偏振分束器 (PBS) 分为两个相互垂直的线性偏振光分别进入光电探测器 PD1 和 PD2, 光隔离器 ISO1 和 ISO2 的作用是为了防止光电探测器反馈的光进入 VCSEL.

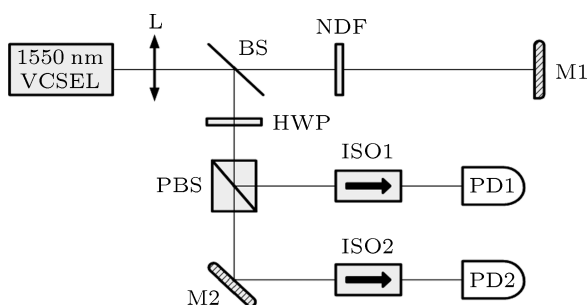


图 1 偏振保持光反馈下 1550 nm-VCSEL 的系统结构示意图 L 为准直透镜, BS 为分束器, NDF 为中性密度滤波器, HWP 为半波片, PBS 为偏振分束器, M 为反射镜, ISO 为光隔离器, PD 为光电探测器

根据自旋反转模型 (SFM)<sup>[1,2]</sup>, 并考虑到光反馈的影响, 描述 1550 nm-VCSELs 的速率方程可表示为

$$\begin{aligned} \frac{dE_{x,y}}{dt} = & k(1 + i\alpha)[(N - 1)E_{x,y} \pm inE_{y,x}] \\ & \mp (\gamma_a + i\gamma_p)E_{x,y} + \eta_{x,y}E_{x,y}(t - \tau)e^{-i\omega\tau} \\ & + F_{x,y}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} = & \gamma_n[\mu - N(1 + |E_x|^2 + |E_y|^2) \\ & + in(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} = & -\gamma_s n - \gamma_n[n(|E_x|^2 + |E_y|^2) \\ & + iN(E_yE_x^* - E_xE_y^*)], \end{aligned} \quad (3)$$

式中下标  $x$  和  $y$  分别代表  $X$  和  $Y$  两个线性偏振模式.  $E$  表示光场慢变振幅,  $N$  为总的载流子密度,  $n$  表示两个自旋反转载流子密度差值,  $k$  为光场衰减率,  $\alpha$  为线宽增强因子,  $\gamma_n$  为总的载流子衰减率,  $\gamma_s$

为自旋反转速率,  $\gamma_a$  和  $\gamma_p$  分别代表有源介质线性色散效应和双折射效应,  $\eta (= k_c(1 - r_0^2)r/(r_0\tau_{in}))$ , 其中  $k_c$  为 VCSEL 与外部反射之间的振幅耦合率,  $r$  为外部反射镜的振幅反射率,  $r_0$  为 VCSEL 前端面振幅反馈率,  $\tau_{in}$  表示激光器的往返时间<sup>[13]</sup> 为反馈强度,  $\tau$  表示反馈时间,  $\mu = J/J_{th}$  为归一化注入电流 ( $\mu$  在阈值时取 1);  $\omega$  为参考频率, 取值为两个偏振光频率的平均值即  $\omega = (\omega_x + \omega_y)/2$ .  $F$  表征自发辐射噪声, 具体形式如下:

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

$$F_y = -i\sqrt{\beta_{sp}/2} (\sqrt{N + n\xi_1} - \sqrt{N - n\xi_2}), \quad (4b)$$

其中  $\beta_{sp}$  是自发辐射噪声强度,  $\xi_1$  和  $\xi_2$  为两个相互独立的高斯白噪声源, 其平均值为 0, 方差为 1.

## 3 结果与讨论

利用四阶龙格-库塔方法对 (1)—(3) 式进行数值求解, 数值模拟所用的参数如下<sup>[12]</sup>:  $k = 125 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\alpha = 2.2$ ,  $\beta_{sp} = 10^{-5} \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_n = 0.67 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_p = 192 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_s = 1000 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\omega = 1221 \text{ THz}$  (对应波长为 1543 nm).

我们在研究过程中发现, 1550 nm-VCSELs 的内部参数中  $\gamma_a$  的取值对两个模式输出功率有很大的影响.  $\gamma_a$  表征 VCSELs 中两个正交的线偏振模式之间的增益差异, 这个差异来自于晶体的增益各向异性、两个偏振模式存在频率差异使其处于增益-频率曲线的不同位置而导致所获得的增益存在差异以及不同偏振模式对应的腔的几何机构差异<sup>[13]</sup>. 通过在制备过程中对上述三个影响  $\gamma_a$  的因素进行控制, 可使 VCSELs 的  $\gamma_a$  具有不同值. 在  $\gamma_a$  取不同值时, 1550 nm-VCSELs 自由运行时的功率——电流 ( $P$ - $I$ ) 曲线如图 2 所示, 其中图 2(a), (b), (c) 分别对应  $\gamma_a = 0.02$ <sup>[12]</sup>,  $0.1, 1 \text{ GHz}$ <sup>[14]</sup>, 图中输出功率为 200 ns 范围内的平均功率. 从图中可以看出,  $\gamma_a$  的取值对激光器输出发生偏振转换时对应的电流值有较大的影响. 随着  $\gamma_a$  的增加, 发生偏振转换所需的电流值逐渐增加, 过大的  $\gamma_a$  可能导致在考察电流区内 (本文归一化电流取值在 0—6 范围内) 观测不到偏振转换. 虽然目前文献上大多把实验中没有观测到 1550 nm-VCSELs 电流变化导致的偏振转换的原因归咎于两偏振模式的激射波长相差太大<sup>[14,15]</sup>, 但以上的结果表明, 1550 nm-VCSELs 的内部参数取值也可能是导致在实验观测范围内未

出现偏振转换的原因. 为了与目前的实验报道相符合, 在后面的讨论中, 假设  $\gamma_a = 1.0$  GHz.

### 3.1 偏振保持光反馈下 1550 nm-VCSELs 的 $P-I$ 特性

图 3 为反馈时间  $\tau = 1$  ns 时, 不同反馈强度下 1550 nm-VCSEL 输出的  $P-I$  曲线. 由于  $\eta = k_c(1 - r_0^2)r/(r_0\tau_{in})$ , 因此通过改变  $k_c$  或者  $r$  很容易改变反馈强度  $\eta$ . 在自由运行情况下 (如图 3(a) 所示), 归一化电流在 0—6 之间变化时, 激光器只有 Y 模激射, X 模始终受到抑制. 引入反馈以后 (如图 3(b)—(d) 所示), 此时激光器输出仍然以 Y 模为主导模式, 在

较大的电流时 X 模将被激发, 但在观察的注入电流变化范围内始终都没有出现 PS 效应.

另外, 从图 3 中还可以看出, 在偏振保持光反馈作用下 1550 nm-VCSEL 中 X, Y 模式的输出功率随着电流的增加总体仍然呈现上升趋势, 但存在波动. 为了说明波动的原因, 图 4 给出了 X 模 (图 4(a)), Y 模 (图 4(b)) 输出功率的极大值随电流的分岔图. 从图中可以看出, 反馈的引入导致激光器中的主导模式——Y 模在不同的偏置电流下呈现不同的非线性动力学状态, 从而导致其平均功率出现起伏. 而 X 模式与 Y 模式共用反转粒子数, 因此其输出功率也会出现相应的起伏.

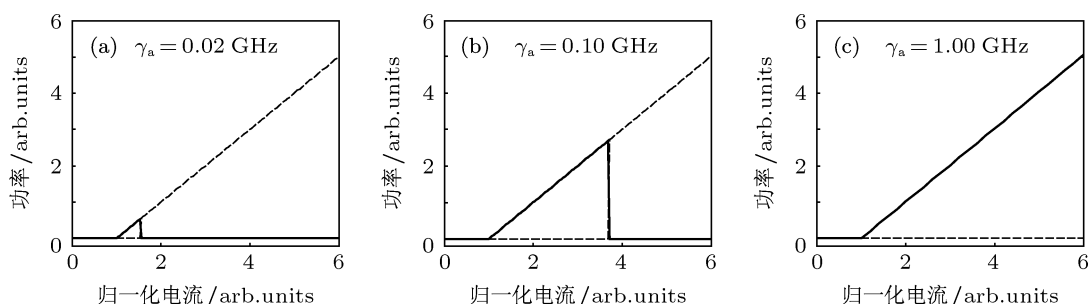


图 2  $\gamma_a$  取不同值时, 自由运行 1550 nm-VCSELs 的  $P-I$  曲线 实线为 Y 偏振模, 虚线为 X 偏振模

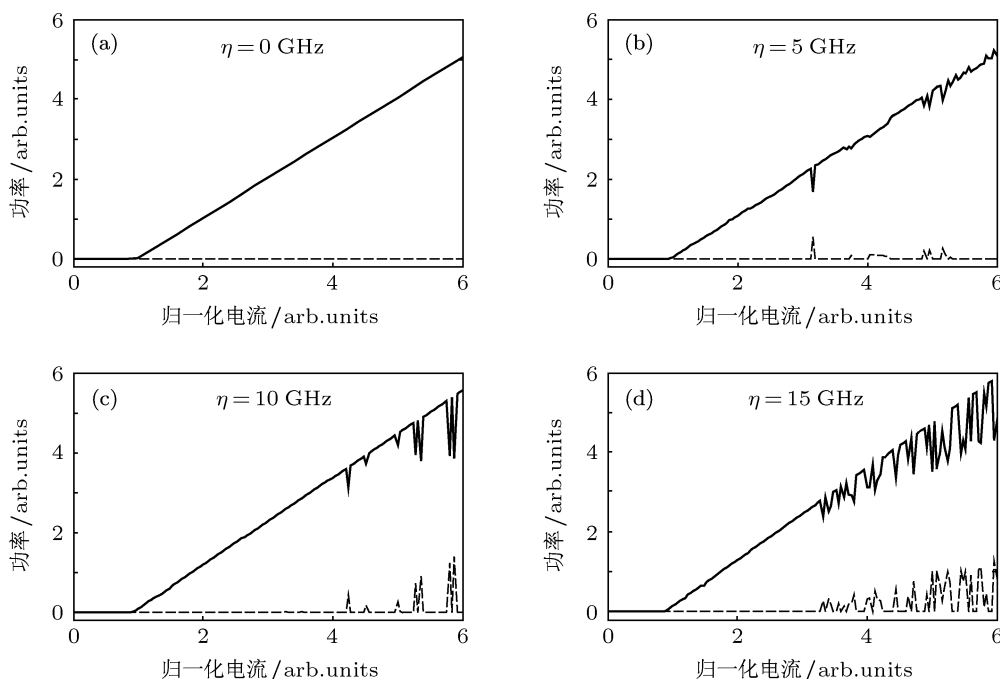


图 3 反馈时间  $\tau = 1$  ns, 偏振保持光反馈下的 1550 nm-VCSEL 的  $P-I$  曲线 (a)—(d) 分别对应反馈强度  $\eta_x = \eta_y = \eta = 0.0, 5.0, 10.0$  和  $15.0$  GHz; 实线为 Y 偏振模, 虚线为 X 偏振模

### 3.2 偏振保持光反馈下 1550 nm-VCSELs 的动力学特性

图 5 为归一化注入电流  $\mu = 1.5$ , 反馈时间  $\tau$  分

别取 1, 2, 3 和 4 ns 时, 1550 nm-VCSEL 的输出功率极值随光反馈强度变化的分岔图. 图中只给出了主导模式 (Y 偏振模式) 的情形. 当  $\tau = 1$  ns (如图 5(a) 所示),  $\eta < 0.83$  GHz 时激光器处于稳定态;

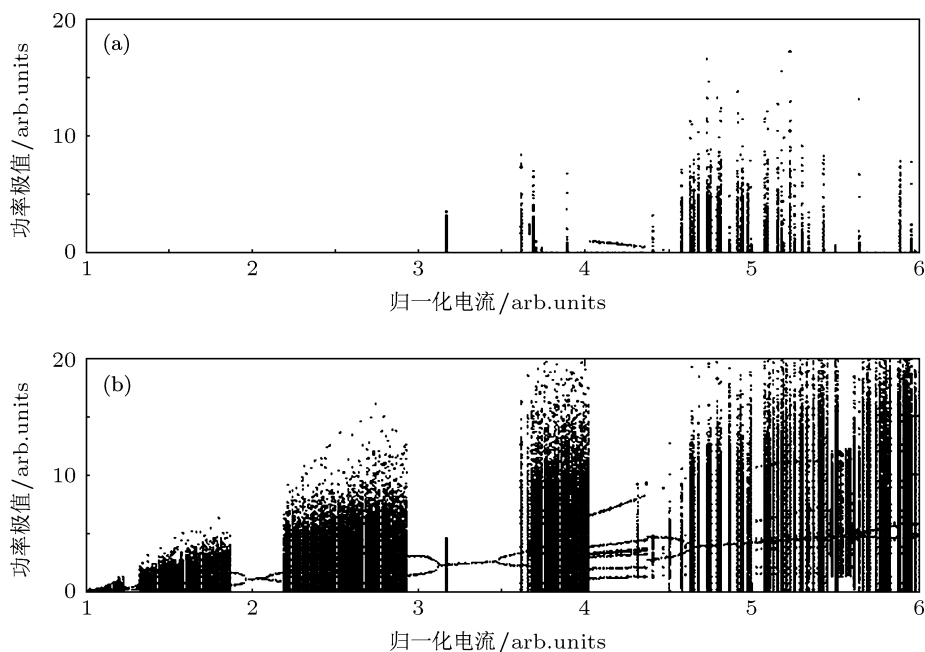


图 4 反馈时间  $\tau = 1$  ns、反馈强度  $\eta_x = \eta_y = \eta = 5$  GHz 时, 1550 nm-VCSEL 输出功率极值随注入电流变化的分岔图 (a) 表示 X 模; (b) 表示 Y 模

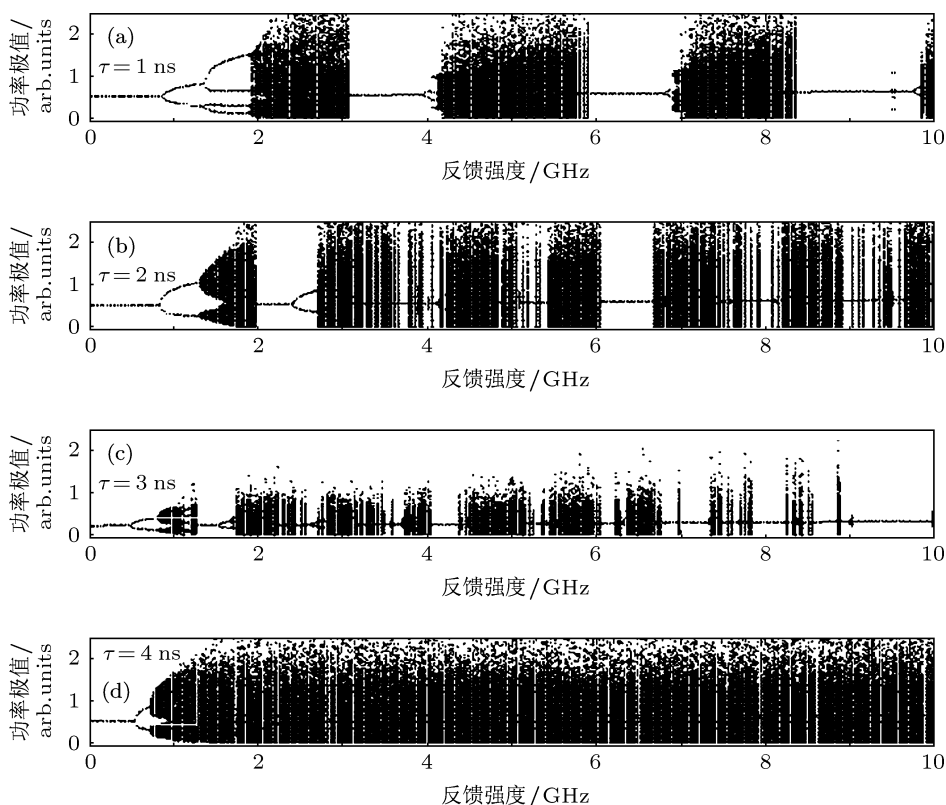


图 5 归一化电流  $\mu = 1.5$  时, 1550 nm-VCSEL 的 Y 模输出功率极值随反馈强度变化的分岔图 (a)—(d) 分别对应  $\tau = 1, 2, 3$  和 4 ns

$\eta$  从 0.83 GHz 增加到 3.05 GHz, 激光器由单周期经过倍周期分岔而进入混沌; 继续增大反馈强度  $\eta$  直到 3.95 GHz, 激光器处于稳态; 当  $\eta$  从 3.95 GHz 增加到 5.90 GHz, 激光器输出由单周期、倍周期、准周期而进入混沌; 之后重复此过程. 当  $\tau = 2$  ns (如图 5(b) 所示),  $\eta < 0.83$  GHz 区域内激光器的输出为稳态;  $\eta$  由 0.83 GHz 增加到 1.95 GHz, 激光器输出由稳态、单周期、准周期进入混沌;  $\eta$  由 1.95 GHz 增加到 2.70 GHz, 激光器则是由稳态经单周期态直接进入混沌, 并在之后呈现阵发混沌演化途径. 当  $\tau = 3$  ns (如图 5(c) 所示),  $\eta < 0.45$  GHz 时激光器输出为稳态;  $\eta$  从 0.45 GHz 增加到 1.25 GHz, 激光器由单周期经过准周期进入混沌; 继续增大  $\eta$ , 激光器的输出首先回到稳态, 再经过单周期、准周期进入混沌; 与图 5(a) 和图 5(b) 相比较可以发现, 随着反馈时间的增大, 激光器输出的混沌区域将逐渐变窄, 但相邻的两个混沌区域之间的间隔逐渐变短. 当  $\tau = 4$  ns (如图 5(d) 所示) 时,  $\eta < 0.53$  GHz 时激光器处于稳态, 之后将由单周期经准周期很快进入混沌态.

图 6 给出当  $\mu = 1.5$ , 反馈时间为 1 ns 时, 激光器主导模式 ( $Y$  偏振模式) 输出的一些典型状态所对应的时间序列、相图及功率谱. 在这里同样对 200 ns 时间窗口内的时间序列的极大值进行采样, 绘制相图. 图 6(a) 对应  $\eta = 1.00$  GHz, 此时时间序列具有相同的峰值强度和间隔, 相图中对应的只有一个极大值点, 在功率谱中对应一个基频  $f_1$  约 1.52 GHz, 该频率接近激光器自由运行时的固有频率 (1.46 GHz), 说明激光器处于单周期 (P1) 态; 图 6(b) 对应  $\eta = 1.70$  GHz, 此时相图中对应有两个极大值点, 在功率谱中出现了一个新频率  $f_2$  约 0.75 GHz, 说明此时激光器处于倍周期 (P2); 图 6(c) 对应反馈强度增加到 1.95 GHz, 此时在时间序列上可以观察到一个由峰值组成的慢变包络, 在相图中呈现出由极大值点组成的二维环面, 此时功率谱中除了  $f_1, f_2$  以外, 还出现了许多其他谐波频率, 各频率中间的间隔分布不像图 6(b) 那样有规律, 此时的功率谱已经不再是分离的离散谱, 这说明激光器进入准周期 (QP); 图 6(d) 对应  $\eta = 2.90$  GHz, 此时相

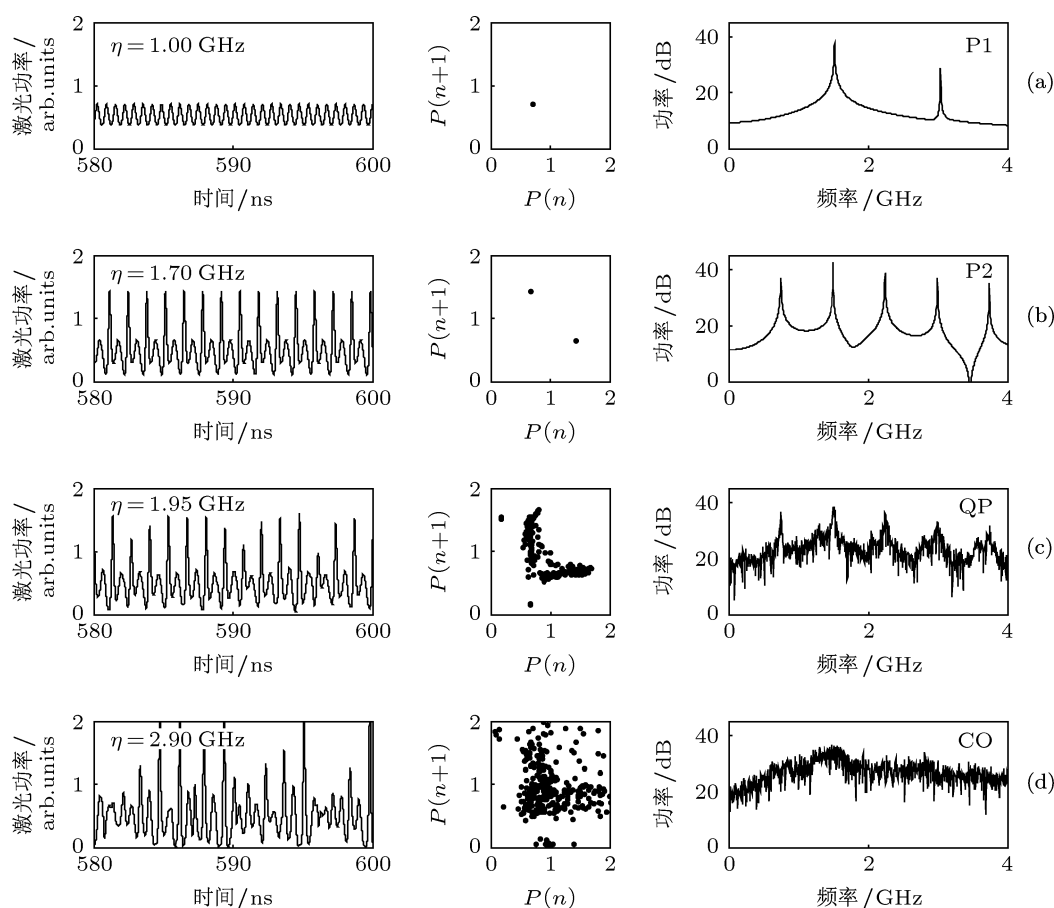


图 6 归一化电流  $\mu = 1.5$ , 反馈时间  $\tau = 1$  ns, 反馈强度取不同值时激光器  $Y$  模输出对应的时间序列、相图和功率谱 (a)–(d) 分别对应  $\eta = 1.00, 1.70, 1.95, 2.90$  GHz; 图中 P1 为单周期, P2 为倍周期, QP 为准周期态, CO 为混沌态

图上得到的是一些成片的随机分布的点, 其功率谱得到了极大的展宽, 并且功率谱线平滑, 没有明显的突起, 说明激光器处于混沌状态 (CO).

## 4 结论

本文基于 SFM 模型, 对偏振保持光反馈作用下 1550 nm-VCSELs 的非线性动力学特性进行了研究. 研究表明: 在自由运行情况下, 1550 nm-VCSELs 的内部参数会影响偏振转换对应的电流值, 随着色散系数  $\gamma_a$  的增大, 其对应的电流值也在不断增加, 直到在考察的电流范围内观测不到偏振

转换现象; 在光反馈作用下, 激光器两个模式的平均输出功率随电流的增加呈现上升趋势, 在上升过程中伴随着起伏; 在反馈时间取不同值时, 随反馈强度的逐渐增大, 激光器输出呈现了从单周期经历倍周期进入混沌、单周期经历准周期进入混沌、以及间歇式混沌等多种混沌演化途径. 本文的研究一方面有助于了解在实际应用过程中 1550 nm-VCSELs 可能遭受到的外部反馈对其工作特性的影响; 另一方面, 针对某些应用领域需要通过人为调控使 1550 nm-VCSELs 工作在特定的动力学状态, 本文工作具有一定的指导意义.

- 
- [1] Miguel M S, Feng Q, Moloney J V 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1728
  - [2] Regalado J M, Prati F, Miguel M S, Abraham N B 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **33** 765
  - [3] Wang X F, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4669 (in Chinese) [王小发, 夏光琼, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 4669]
  - [4] Yang B X, Xia G Q, Lin X D, Wu Z M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1480 (in Chinese) [杨炳星, 夏光琼, 林晓东, 吴正茂 2009 物理学报 **58** 1480]
  - [5] Kuksenkov D V, Temkin H 1997 *IEEE J. Quantum Electron.* **3** 390
  - [6] Sciamanna M, Panajotov K, Thienpont H, Veretennicoff I, Mégret P, Blondel M 2003 *Opt. Lett.* **28** 1543
  - [7] Li X F, Pan W, Luo B, Ma D, Deng G 2006 *IEE Proc. Optoelectron.* **153** 67
  - [8] Robert F, Besnard P, Charès M L, Stéphan G M 1995 *Opt. Quantum Electron.* **27** 805
  - [9] Zhong D Z, Cao W H, Wu Z M, Xia G Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1548 (in Chinese) [钟东洲, 曹文华, 吴正茂, 夏光琼 2008 物理学报 **57** 1548]
  - [10] Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2151
  - [11] Paul J, Masoller C, Hong Y H, Spencer P S, Shore K A 2007 *J. Opt. Soc. Am. B* **24** 1987
  - [12] Al-Seyab R, Schires K, Khan N A, Hurtado A, Henning I D, Adams M J 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1242
  - [13] Ohtsubo J 2007 *Semiconductor Lasers* (2nd Edn.) (Berlin: Springer) p67, 237
  - [14] Torre M, Hurtado A, Quirce A, Valle A, Pesquera L, Adams M J 2011 *IEEE J. Quantum Electron.* **47** 92
  - [15] Hurtado A, Quirce A, Valle A, Presquera L, Adams M J 2010 *Opt. Express* **18** 9423

# Nonlinear dynamics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser with polarization-preserved optical feedback\*

Zheng An-Jie Wu Zheng-Mao Deng Tao Li Xiao-Jian Xia Guang-Qiong<sup>†</sup>

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

(Received 15 April 2012; revised manuscript received 17 May 2012)

## Abstract

Based on the framework of the spin-flip model, the nonlinear dynamics of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) subject to polarization-preserved optical feedback is theoretically investigated. The results show that for a free-running 1550 nm-VCSEL, the current value for polarization switching (PS) is affected seriously by the internal parameters; with the increase of the gain anisotropy coefficient  $\gamma_a$ , the corresponding current for PS increases. Due to the introduction of the polarization-preserved optical feedback, the dominant polarized mode ( $Y$  polarized mode) will display different dynamical states for different injection currents while the other mode ( $X$  polarized mode) may be excited. As a result, the average output powers of the two polarized modes increase with fluctuation with the increase of current. For different feedback times, the dynamic states of 1550 nm-VCSEL with polarization-preserved optical feedback maybe route into chaos via different evolution paths such as period doubling bifurcation, quasi-periodic bifurcation and intermittent chaos.

**Keywords:** 1550 nm vertical-cavity surface emitting laser, nonlinear dynamics, polarization-preserved, optical feedback

**PACS:** 42.55.Px, 42.65.Sf

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978003, 61078003, 61178011, 61275116) and the Natural Science Foundation of Chongqing City, China (Grant No. CSTC2012jjB40011).

<sup>†</sup> E-mail: gqxia@swu.edu.cn