

doi: 10.3788/gzxb20164501.0114002

光电反馈下光注入 VCSELs 的动力学特性

何洋, 邓涛, 邱海英, 朱万清, 吴正茂, 夏光琼

(西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715)

摘 要: 基于垂直腔面发射激光器的自旋反转模型, 研究了光电负反馈下 1 550 nm 正交偏振光注入垂直腔面发射激光器的非线性动力学特性. 研究表明: 在合适的注入强度和失谐频率条件下, 自由运行工作在 Y 线偏振模式的 1 550 nm 垂直腔面发射激光器可呈现出稳态、稳定注入锁定、单周期、二倍周期、多周期、混沌等多种非线性动力学状态以及偏振转换现象; 引入光电负反馈后, 1 550 nm 正交偏振光注入垂直腔面发射激光器将呈现出双频准周期、三频准周期等动力学状态. 在注入强度和失谐频率构成的参数空间, 反馈延时时间一定时, 反馈强度大小对该激光器的动力学状态分布有明显影响; 光电反馈强度一定时, 在注入强度相对较小的区域, 反馈延时时间对该激光器动力学状态分布也有明显影响, 而对于注入强度相对较大的区域, 该激光器始终工作在单周期或稳定注入锁定态, 即反馈延时时间对激光器动态行为的影响较弱.

关键词: 非线性光学; 非线性控制; 数值分析; 垂直腔面发射激光器; 正交偏振光注入; 光电负反馈

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0114002-8

Nonlinear Dynamics of Optical Injected VCSELs Subject to Optoelectronic Feedback

HE Yang, DENG Tao, QIU Hai-ying, ZHU Wan-qing, WU Zheng-mao, XIA Guang-qiong
(School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Based on the Spin-flip Model, the nonlinear dynamical characteristics of a 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser subject to orthogonally polarized beams injection and negative optoelectronic feedback was investigated. The results show that, for a free-running 1 550 nm vertical-cavity surface-emitting laser lasing at the Y linear polarization mode, under suitable injection strength and frequency detuning, 1 550 nm orthogonally polarized optical injected vertical-cavity surface-emitting laser can exhibit many nonlinear dynamic behaviors such as Stable State, Period-one, Period-two, Multi-period, Chaos, Stable Injection Locking and Polarization Switching phenomena. Then, after introducing the negative optoelectronic feedback, some new nonlinear dynamic behaviors, such as Double Frequency Quasi-periodic Oscillation, Triple Frequency Quasi-periodic Oscillation, can be observed. For a certain feedback delay, the dynamic distribution regions of the orthogonally polarized optical injected vertical-cavity surface-emitting laser outputs in the parameter space of injection strength and frequency detuning will be influenced by the optoelectronic feedback strength. Under certain optoelectronic feedback strength, for relatively small injection strength, the feedback delay has an obvious effect on the dynamic distribution regions in the parameter space of injection strength and frequency detuning. For relatively larger injection strength, the delay time has little effect on the dynamic distribution regions and the laser almost operates at Period-one or Stable Injection Locking state.

Key words: Nonlinear optics; Nonlinear control; Numerical analysis; Vertical-cavity surface-emitting

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61178011, 61275116, 61475127, 11204248, 61575163) 和中央高校基本科研业务费 (No. XDJK2014C168) 资助

第一作者: 何洋 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光非线性动力学. Email: heyang0106@126.com

导师 (通讯作者): 邓涛 (1982-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为基于半导体激光器的非线性动力学及其应用. Email: dengt@swu.edu.cn

收稿日期: 2015-08-24; 录用日期: 2015-10-20

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

lasers; Orthogonally polarized optical injection; Negative optoelectronic feedback

OCIS Codes: 140.5960; 140.7260; 190.4360; 190.3100

0 引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSELs) 在自由运行或适当的外部扰动下可呈现出单周期 (Period-one, P1)、二倍周期 (Period-two, P2)、准周期 (Quasi-Period, QP)、混沌 (Chaos, CO) 等一系列非线性动力学行为^[1-7], 这些动力学行为在光信息处理^[8]、光混沌保密通信^[9]、高频微波产生技术^[10]、高速真随机数获取技术^[11]等领域具有潜在应用价值. 早期研究主要集中在短波长 ($< 1\mu\text{m}$) VCSELs 的材料体系、结构、器件性能^[12-14], 以及其在自由运行^[1]或在光注入^[2-3]、光反馈^[4-5]、光电反馈^[6-7]等外部扰动下的非线性动力学特性. 近年来, 随着长波长 ($> 1\mu\text{m}$) VCSELs 制作工艺的日渐成熟和工作性能的显著提升, 其在通信、信息处理、光生微波等领域展现出了极大的应用价值^[15-17]. 因此, 对长波长尤其是波长位于通信窗口的 1 550 nm VCSELs 研究具有十分重要的意义.

外光注入技术是一种调控半导体激光器动力学输出的有效手段之一^[18], 目前, 该技术已广泛用于 1550nm VCSELs 的非线性动力学特性研究, 即采用平行^[19]、正交^[20-24]以及偏振可变^[25-26]等不同方式引入外部注入偏振光. Pérez 等实验研究了注入正交偏振光频率分别在自由运行激光器的主激射模式频率和次激射模式频率附近时 1 550 nm VCSELs 的偏振分辨非线性动力学行为, 并分析了系统的偏振开关 (Polarization Switching, PS) 特性^[20-21]. Torre 等从理论和实验上讨论了正交偏振光注入 1 550 nm VCSELs 发生 PS 时所需注入光功率与失谐频率的关系^[22]; Daly 等实验研究了正交偏振光注入 1 550 nm VCSELs 输出的动力学态与工作电压响应之间的关系^[23]; Lin 等实验证实了正交偏振光注入 1 550 nm VCSELs 在适当的注入条件下可获得椭圆偏振注入锁定态^[24]. 除外光注入外, 光电反馈技术也是一种调控半导体激光器动力学输出的有效手段, 因其对光场相位变化不敏感, 从而具有易于调控等优点^[27-29]. 文献^[30]曾对 1 550 nm VCSELs 在正光电反馈下的非线性动力学行为进行了相关研究, 观察到了规则脉冲、准周期脉冲、混沌脉冲等动力学状态. 已有研究表明, 同时将两种外部扰动引入到半导体激光器中将提升系统的可调控能力, 而且可能观测到一些新的动力学状态^[31-33]. 单独的正交偏振光注入或光电反馈的引入均可使 1 550 nm VCSELs 呈现出较丰富的非线性动态行为, 本文讨论了将这两种扰动方式同时引入, 即引入正交偏振光注入后进一步引入光电负反馈时 1 550 nm VCSELs 的非

线性动力学行为, 着重分析光电反馈强度和反馈延迟时间对 1 550 nm 正交偏振光注入 VCSELs 非线性动力学状态在注入强度和失谐频率参数空间分布的影响.

1 理论模型

基于 VCSELs 的自旋反转模型 (Spin-flip Model, SFM)^[34], 并考虑正交偏振光注入与光电负反馈的影响后, 描述 VCSEL 工作特性的速率方程组为

$$\frac{dE_x}{dt} = \kappa(1 + i\alpha)[(D-1)E_x + inE_y] - (\gamma_a + i\gamma_p)E_x + \eta_x E_{inj,x} e^{-i2\pi(f_{inj,x} - f_0)t} + F_x \quad (1)$$

$$\frac{dE_y}{dt} = \kappa(1 + i\alpha)[(D-1)E_y - inE_x] + (\gamma_a + i\gamma_p)E_y + \eta_y E_{inj,y} e^{-i2\pi(f_{inj,y} - f_0)t} + F_y \quad (2)$$

$$\frac{dD}{dt} = -\gamma_c D(1+P) + \gamma_e \mu \left[1 - \kappa_f \frac{P(t - \tau_f)}{P_0}\right] - i\gamma_e n(E_y E_x^* - E_x E_y^*) \quad (3)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma_s n - \gamma_e n P - i\gamma_e D(E_y E_x^* - E_x E_y^*) \quad (4)$$

$$P_{x,y} = |E_{x,y}|^2 \quad (5)$$

$$P = P_x + P_y \quad (6)$$

式中, 下标 x, y 分别代表 X 和 Y 偏振分量. E 表征光场慢变振幅, 其为一无量纲的量, $|E|^2$ 对应功率 P , κ (ns^{-1}) 为光场衰减率, α 为线宽加强因子, D 为总的载流子数, n 为自旋反转载流子数的差值, γ_a (ns^{-1}) 代表线性色散效应, γ_p (ns^{-1}) 代表有源介质线性双折射效应, γ_s (ns^{-1}) 为自旋反转速率, γ_e (ns^{-1}) 为总的载流子衰减率, κ_f 为光电反馈系数, τ_f (ns) 为光电反馈延时, $\mu = J/J_{th}$ (J 为偏置电流, J_{th} 为阈值电流) 为归一化注入电流, P_0 为自由运行时的输出功率, η_x (GHz)、 η_y (GHz) 分别为 X, Y 偏振分量对应的注入强度, $E_{inj,x}$ 、 $E_{inj,y}$ 分别为 X, Y 偏振分量对应的注入光场的幅度, $f_{inj,x}$ (GHz)、 $f_{inj,y}$ (GHz) 分别为 X, Y 偏振分量对应的注入光频率, $f_0 = (f_x + f_y) / 2$ (f_x (GHz), f_y (GHz) 分别为 1 550 nm VCSEL 自由运行时 X, Y 偏振模式对应的频率) 为 1 550 nm VCSEL 自由运行时的中心频率. F 表示自发辐射的噪声, 即

$$F_x = \sqrt{\beta_{sp}} \xi_x \quad (7)$$

$$F_y = \sqrt{\beta_{sp}} \xi_y \quad (8)$$

式中, β_{sp} 为自发辐射噪声强度, ξ_x 、 ξ_y 分别为两个独立的高斯白噪声, 其平均值为 0, 方差为 1.

2 结果与讨论

利用 4 阶 Runge-Kutta 方法对式(1)~(6)进行数

值求解,数值求解中所用的参数取值为^[22]: $\alpha=3$, $\kappa=300\text{ ns}^{-1}$, $\gamma_a=1\text{ ns}^{-1}$, $\gamma_c=1\text{ ns}^{-1}$, $\gamma_s=1\text{ 000 ns}^{-1}$, $\gamma_p=192.1\text{ ns}^{-1}$, $\beta_{sp}=10^{-6}$,自由运行时 VCSEL 的频率 $f_0=1.9417\times 10^2\text{ THz}$.在此参数条件下,VCSEL 自由运行的 $P-\mu$ 曲线如图 1,图中虚线代表 X 偏振分量的输出功率,实线代表 Y 偏振分量的输出功率.从图 1 可以看出,当归一化电流 $\mu>1$ 时,Y 模式激励,而 X 模式始终处于抑制状态,在研究的偏置电流范围内没有 PS 的出现.下文讨论中,选取 $\mu=2.5$,VCSEL 自由运行时只有 Y 偏振分量输出,正交偏振光注入时,对应注入光的偏振态与 X 偏振分量一致的情形,即 $\eta_y=0$ 而 $\eta_x\neq 0$.基于此,文中注入强度 η 即为 η_x ,而频率失谐 Δf 则为外部注入光频率 $f_{inj,x}$ 与自由运行 VCSEL X 偏振分量的频率 f_x 之差,即 $\Delta f=f_{inj,x}-f_x$.

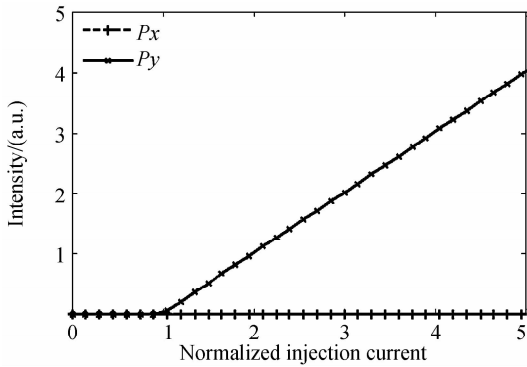
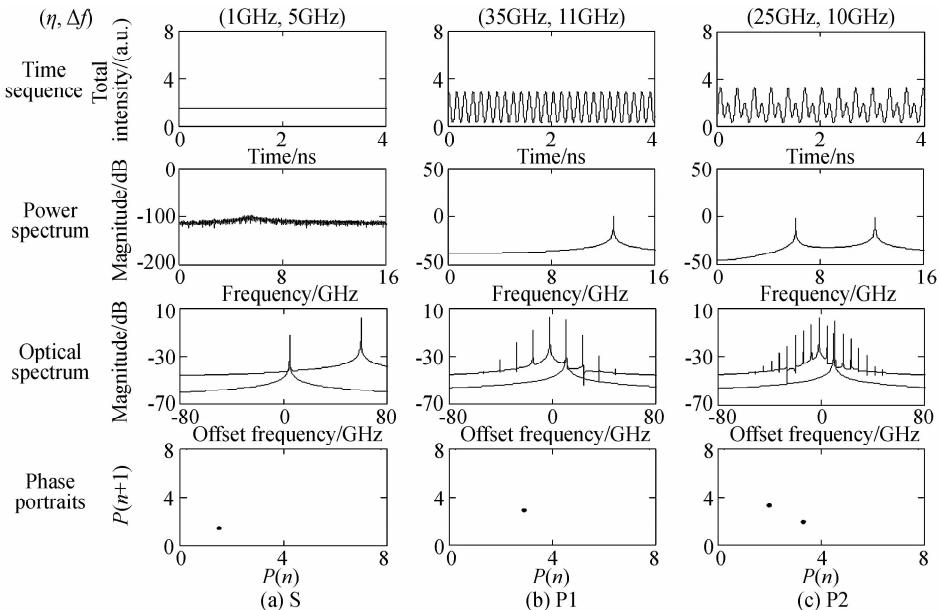


图 1 1550 nm VCSEL 自由运行时偏振分辨的 $P-\mu$ 曲线
Fig. 1 Polarization-resolved $P-\mu$ curve for a free-running 1550 nm VCSEL

2.1 正交偏振光注入 VCSEL 的非线性动力学特性

图 2 为不同注入参数条件下 1550 nm VCSEL 输



出的部分典型状态的时间序列、功率谱、光谱和相图,其中,光谱中黑色实线对应激光器总输出的光谱,灰色实线代表注入光的光谱.

当 $\eta=1\text{ GHz}$, $\Delta f=5\text{ GHz}$ 时,如图 2(a),此时注入光较弱,对 VCSEL 的影响很小,激光器输出依然处于稳态 (Stable State, S);当 $\eta=35\text{ GHz}$, $\Delta f=11\text{ GHz}$ 时,如图 2(b),此时激光器输出的时间序列具有几乎相同的峰值强度和间隔,相应的相图仅只有一个极大值点,在功率谱中对应一个频率约为 12.8 GHz 的单峰,表明激光器处于 P1 态;当 $\eta=25\text{ GHz}$, $\Delta f=10\text{ GHz}$ 时,如图 2(c),此时激光器输出的时间序列中存在两个峰值,在功率谱上除了基频外,在 6.1 GHz (约为 1/2 基频) 的地方出现了一个新的频率峰,其对应的相图为两个极大值点,表明此时激光器工作在 P2 态;当 $\eta=32.5\text{ GHz}$, $\Delta f=8\text{ GHz}$ 时,如图 2(d),此时时间序列出现了多个极值,功率谱中除了基频外还出现了其它一些频率峰,其对应的相图出现了多个离散的点,表明此时激光器处于多周期 (Multi-Period, MP) 态;当 $\eta=12.5\text{ GHz}$, $\Delta f=-0.5\text{ GHz}$ 时,如图 2(e),激光器输出类似于噪声的时间序列,相图上得到一些随机分布的点,其功率谱变得连续光滑,光谱得到明显展宽,说明激光器已经进入了 CO 态.当 $\eta=20\text{ GHz}$, $\Delta f=-7\text{ GHz}$ 时,如图 2(f),激光器输出的功率维持在一个稳定值,相图上只有一个点,从光谱上可以看出此时激光器的激励频率与注入光的频率一致,表明此时激光器处于稳定的注入锁定 (Stable Injection Locking, SIL) 态.

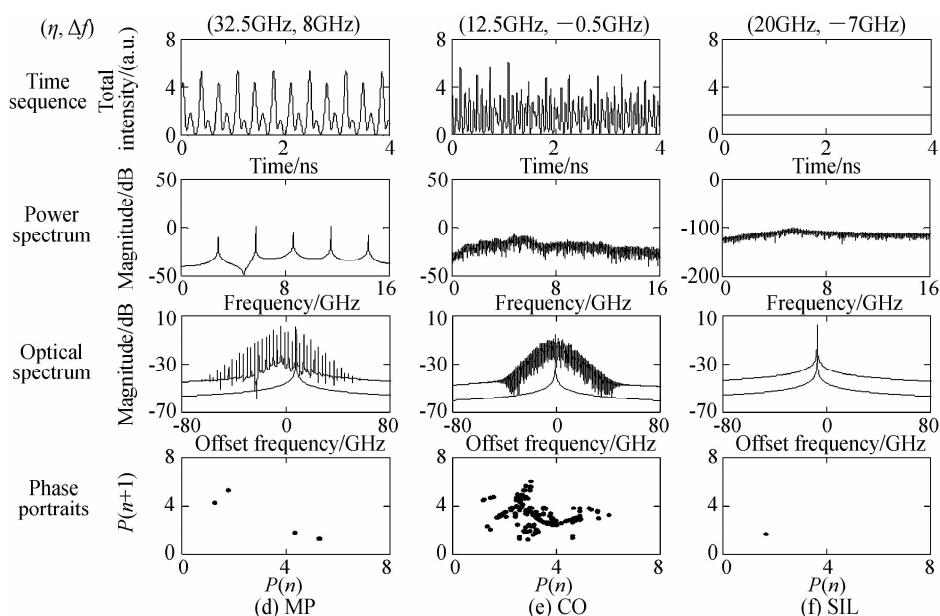


图2 不同注入参数下1550 nm VCSEL总输出的时间序列、功率谱、光谱、相图

Fig. 2 Time series, power spectra, optical spectra and phase portraits of some typical dynamical state output from 1550nm VCSEL under different injection parameters

为了更清楚地说明注入参数对1550 nm正交偏振光注入VCSEL的非线性动力学状态的影响,图3给出了1550 nm正交偏振光注入VCSEL动力学状态在注入强度 η 和频率失谐 Δf 构成的参数空间的分布图谱.其中,PS代表偏振转换,阴影部分代表PS区,带圆圈的实线代表PS区域的边界,其它符号与图2一样.从图中可以看出,1550 nm正交偏振光注入VCSEL可呈现出S、P1、P2、MP、CO、SIL等多种非线性动力学状态,同时,还可观察到PS现象.在研究中,当1550 nm正交偏振光注入VCSEL自由运行时,PS对应被抑制的X偏振分量转变成为主激励分量且对Y偏振分量的抑制比大于30 dB的情况.从图中还可以看出,当发

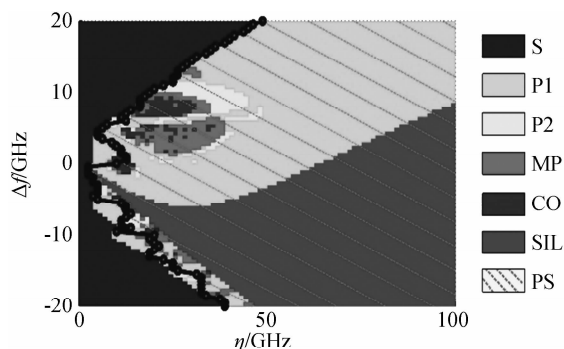


图3 1550 nm正交偏振光注入VCSEL输出各动力学状态在注入强度 η 和频率失谐 Δf 参数空间的分布图

Fig. 3 Mapping of the dynamical states of 1550 nm orthogonally polarized optical injected VCSEL in the parameter space of η and Δf

生PS现象时激光器处于SIL、周期振荡甚至混沌工作状态.存在多个失谐频率使产生PS所需的注入功率取得极小值,这些结果与之前的实验报道基本一致^[22].在本文所给的参数条件下,当频率失谐为-0.5 GHz时,发生PS所需要的注入强度取得最小值2.5 GHz.

2.2 光电负反馈对1550 nm正交偏振光注入VCSEL非线性动力学特性的影响

图4给出了引入 $\tau_i = 1$ ns, $\kappa_i = 0.16$ 的光电负反馈后,不同注入参数条件下1550 nm正交偏振光注入VCSEL输出的一些典型动力学特征.光谱中黑色实线代表激光器总输出的光谱,灰色实线代表注入光的光谱.综合比较图2和图4可以看出,与无光电反馈时相比,引入光电负反馈后1550 nm正交偏振光注入VCSEL呈现的非线性动力学行为更加丰富,即双频准周期(Double Frequency Quasi-periodic Oscillation, Q2)、三频准周期(Triple Frequency Quasi-periodic Oscillation, Q3)等新的动力学态被观察到.当 $\eta = 1$ GHz, $\Delta f = 4.5$ GHz时,如图4(d),在频谱上可以看到在717 MHz处有一个与基频不成整数倍关系的频率峰,其相应的相图呈一个环状分布,可见此时激光器处于Q2态.当 $\eta = 37.8$ GHz, $\Delta f = 8.6$ GHz时,如图4(e),激光器进入Q3态,与Q2态相比,此时激光器输出的相图近似呈一个环面^[28].为了便于讨论,在下文讨论中,把MP、Q2、Q3等状态统称为过渡态(Transition State, TS).

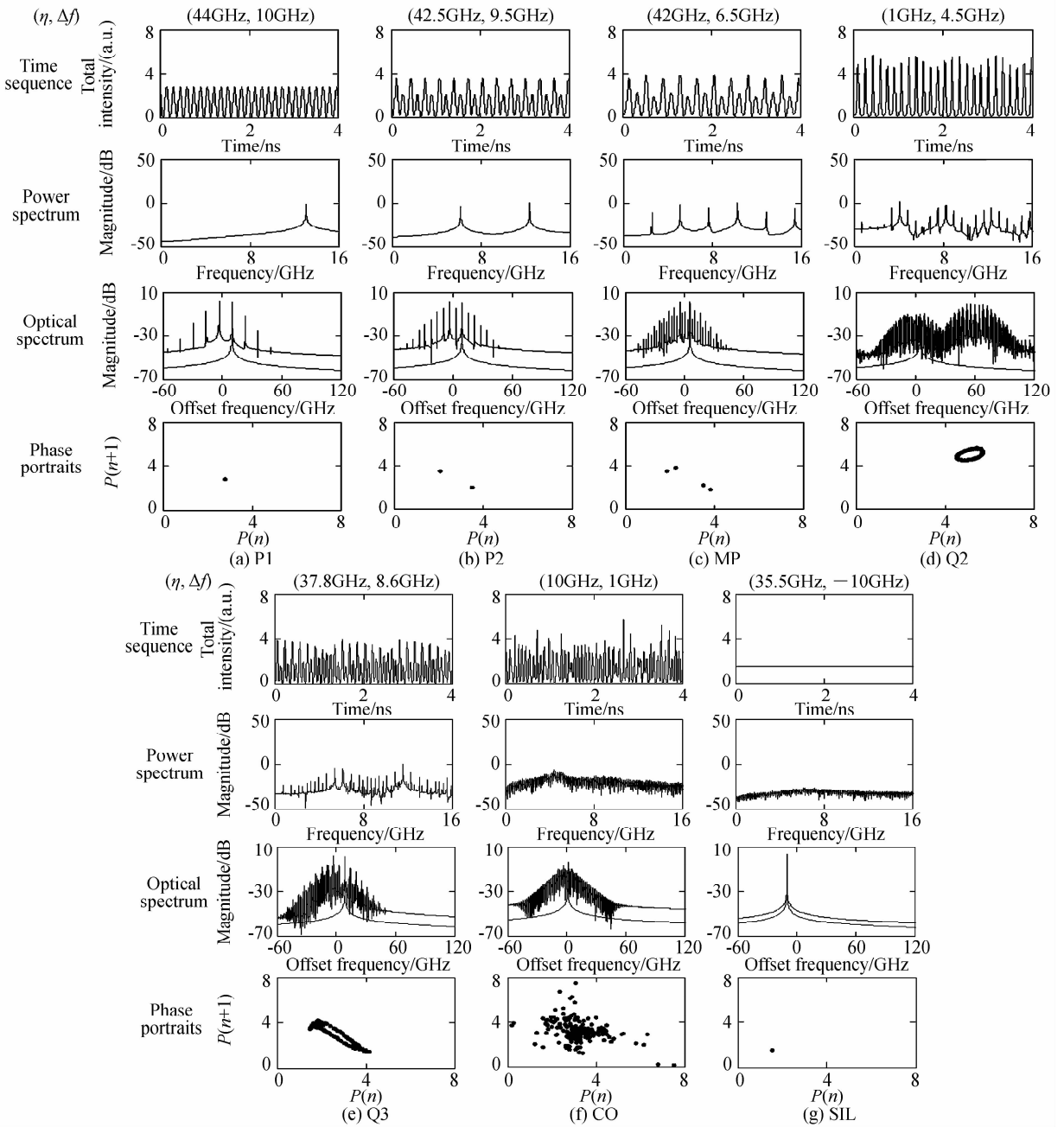


图4 引入光电负反馈 ($\tau_f=1\text{ ns}$, $\kappa_f=0.16$)后,不同注入参数下1550 nm正交偏振光注入 VCSEL 总输出的时间序列、功率谱、光谱图、相图

Fig. 4 Time series, power spectra, optical spectra and phase portraits of 1550 nm orthogonally polarized optical injected VCSEL total outputs under $\tau_f=1\text{ ns}$ and $\kappa_f=0.16$ and different injection parameters

由图4可知,引入特定的光电负反馈后,1550 nm正交偏振光注入 VCSEL 的动力学状态与无反馈时存在差异.接下来,将讨论光电负反馈的反馈强度 κ_f 以及反馈时间 τ_f 对1550 nm正交偏振光注入 VCSEL 非线性动力学特性的影响.首先,假定反馈延时 τ_f 固定,讨论反馈强度大小对该激光器输出的动力学状态分布的影响.图5给出了 $\tau_f=1\text{ ns}$,反馈强度取不同值时激光器输出的动力学状态在注入强度 η 和频率失谐 Δf 参数空间的动态分布图.其中,(a)~(d)分别代表反馈强度 $\kappa_f=0.08, 0.12, 0.16$ 和 0.2 的情况.从图中可

以看出,光电负反馈强度对激光器输出在注入强度和频率失谐参数空间的动态分布有明显的影响.随着光电负反馈强度的增大,S区域逐渐减小,部分稳态逐渐被周期振荡、准周期振荡甚至混沌工作态取代,CO对应的区域逐渐扩大,而SIL对应区域基本上不随光电负反馈强度的变化而变化.这可能是由于随着光电反馈强度的增加,激光器的偏置电流受到更大的扰动影响,使激光器输出动力学行为更加复杂,从而导致激光器输出的CO区随反馈强度的增加而增加,而S区域逐渐减小.当激光器进入SIL区后,外部注入光扮演了主

导角色,此时光电负反馈的影响相对较小,因而 SIL 区基本上不随反馈强度的变化而变化.此外,在不同的光电反馈强度下,PS 现象总是伴随着激光器处于 SIL、周期振荡甚至混沌工作态.光电反馈强度对出现 PS 所需

的注入强度有一定的影响,光电反馈的引入使发生 PS 所需的注入强度出现更多极值点.

图 6 给出了反馈强度 $\kappa_f=0.12$ 时,不同反馈延迟时 1 550 nm 正交偏振光注入 VCSEL 输出的动力学状

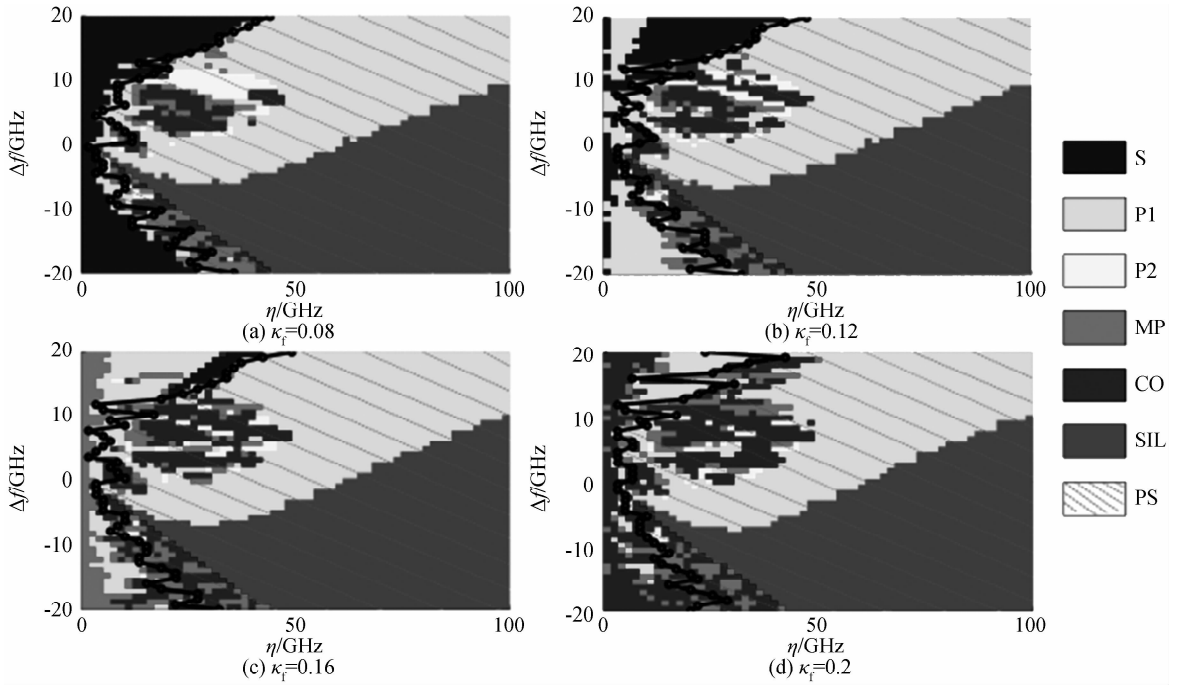


图 5 当 $\tau_f=1$ ns 时,不同光电反馈强度下 1 550 nm 正交偏振光注入 VCSEL 输出的动力学态在注入强度 η 和频率失谐 Δf 参数空间的分布图

Fig. 5 Mappings of 1 550 nm orthogonally polarized optical injected VCSEL outputs in the parameter space of η and Δf for $\tau_f=1$ ns with different optoelectronic feedback strength

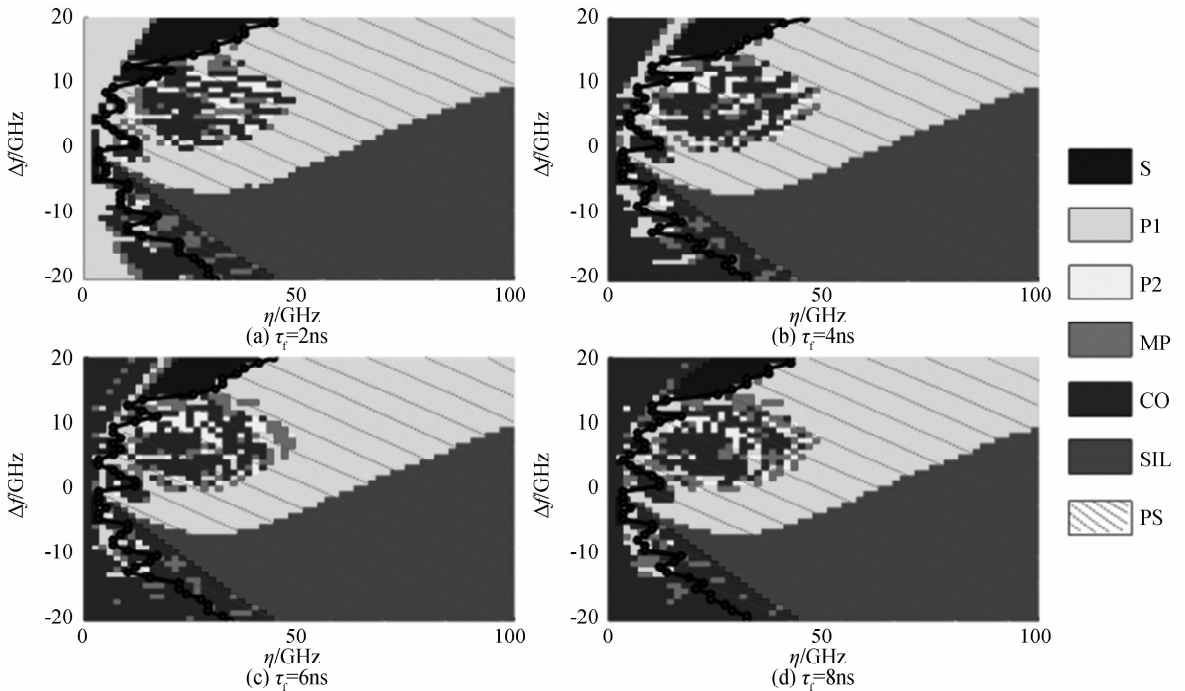


图 6 当 $\kappa_f=0.12$ 时,不同反馈延迟时间下 1 550 nm 正交偏振光注入 VCSEL 输出的动力学态在注入强度 η 和频率失谐 Δf 参数空间的分布图

Fig. 6 Mappings of 1 550 nm orthogonally polarized optical injected VCSEL outputs in the parameter space of η and Δf for $\kappa_f=0.12$ and different feedback delay

态在注入强度 η 和频率失谐 Δf 参数空间的动态分布图. 其中, (a)~(d) 分别代表反馈延时 $\tau_f = 2, 4, 6$ 和 8 ns 的情况. 从图中可以看出, 对于给定的光电反馈强度, 当注入强度小于 50 GHz 时, 反馈延时对 1550 nm 正交偏振光注入 VCSEL 输出的非线性动力学状态在注入强度和频率失谐参数空间的分布有一定的影响. 随着反馈延时的增加, S、P1、P2 等状态对应的区域减小, 而 CO 对应的区域逐渐变大, 说明激光器的非线性动力学行为会随着反馈时延的增加变得更加复杂. 然而, 反馈延时的变化对激光器输出在 SIL 区的分布几乎没有影响. 当注入强度大于 50 GHz 时, 此时光电反馈延时对激光器动态输出的影响很小, 激光器始终工作在 P1 或 SIL 态.

3 结论

基于 SFM, 本文研究了光电负反馈对 1550 nm 正交偏振光注入 VCSELs 的非线性动力学特性的影响. 研究表明, 在适当的正交偏振光注入参数 (注入强度和失谐频率) 下 1550 nm VCSEL 可呈现 S、P1、P2、MP、SIL、CO 等一系列复杂的非线性动力学行为及 PS 现象. 光电负反馈的引入可使 1550 nm 正交偏振光注入 VCSEL 呈现出 Q2、Q3 等新的动力学状态. 对于确定的反馈延时, 光电反馈强度对激光器输出的动力学状态在注入强度和频率失谐参数空间的分布有明显的影响. 随着光电反馈强度的增大, S 区域逐渐减小, 而 CO 的区域逐渐扩大, SIL 态对应的区域基本上不随光电反馈强度的变化而发生变化. 对于确定的光电反馈强度, 当注入强度小于 50 GHz 时, 光电反馈延时对激光器动力学状态在注入强度和频率失谐参数空间的分布有明显的影响. 随着反馈延时的增加, S、P1 和 P2 区域逐渐减小, 而 CO 区域逐渐加大; 当注入强度大于 50 GHz 时, 反馈延时对激光器动态输出行为的影响较小, 激光器始终工作在 P1 或 SIL 态. 与单独的正交偏振光注入或光电反馈下 1550 nm VCSELs 的非线性动力学行为相比, 1550 nm VCSELs 在正交偏振光注入和光电反馈共同作用下呈现出了更为复杂的非线性动力学行为. 本文的研究对进一步探索 1550 nm VCSELs 在外部扰动下的非线性动力学及其相关应用有一定的参考价值.

参考文献

- [1] SCIAMANNA M, SHORE K A. Physics and applications of laser diode chaos[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**(3): 151-162.
- [2] ALTÈS J B, GATARE I, PANAJOTOV K, *et al.* Mapping of the dynamics induced by orthogonal optical injection in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, **42**(2): 198-207.
- [3] HONG Yan-hua, SPENCER P S, REES P, *et al.* Optical injection dynamics of two-mode vertical cavity surface-emitting

- semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(3): 274-278.
- [4] PANAJOTOV K, SCIAMANNA M, ARTEAGA M A, *et al.* Optical feedback in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1700312.
- [5] QADER A A, HONG Yan-hua, SHORE K A. Circularly polarized optical feedback effects on the polarization of VCSEL emission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(14): 1200-1202.
- [6] ZHANG Wei-li, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Theoretical study on polarization dynamics of VCSELs with negative optoelectronic feedback[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(29): 7262-7266.
- [7] TAN Jian-feng, ZHANG Sheng-hai, WANG Wei, *et al.* Chaotic dynamic behaviors of vertical cavity surface emitting laser with delayed optical feedback[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 272-276.
谭建锋, 张胜海, 王伟, 等. 延迟光反馈 VCSEL 的混沌动力学特性, 光子学报, 2011, **40**(2): 272-276.
- [8] CHEN Jian-jun, XIA Guang-qiong, WU Zheng-mao. Power-induced polarization switching and bistability characteristics in 1550 -nm VCSELs subjected to orthogonal optical injection[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(2): 024210.
- [9] LIU Jiao, WU Zheng-mao, XIA Guang-qiong. Dual-channel chaos synchronization and communication based on unidirectionally coupled VCSELs with polarization-rotated optical feedback and polarization-rotated optical injection[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12619-12626.
- [10] ZHOU Ya, WU Zheng-mao, FAN Li, *et al.* Two channel photonic microwave generation based on period-one oscillations of two orthogonally polarized modes in a vertical-cavity surface-emitting laser subject to an elliptically polarized optical injection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(20): 204203.
周娅, 吴正茂, 樊利, 等. 基于椭圆偏振光注入垂直腔表面发射激光器的正交偏振模式单周期振荡产生两路光子微波[J]. 物理学报, 2015, **64**(20): 204203.
- [11] VIRTE M, MERCIER E, THIENPONT H, *et al.* Physical random bit generation from chaotic solitary laser diode[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(14): 17271-17280.
- [12] LI Lin, ZHONG Jing-chang, ZHANG Yong-ming, *et al.* Study on growth and characteristics of vertical-cavity surface-emitting laser structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 343-345.
李林, 钟景昌, 张永明, 等. 垂直腔面发射激光器的结构生长及特性研究[J]. 光子学报, 2005, **34**(3): 343-345.
- [13] ORENSTEIN M, VON LEHMEN A C, CHANG-HASNAIN C, *et al.* Vertical-cavity surface-emitting InGaAs/GaAs lasers with planar lateral definition[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, **56**(24): 2384-2386.
- [14] WEIGL B, GRABHERR M, JUNG C, *et al.* High-performance oxide-confined GaAs VCSEL's[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, **3**(2): 409-415.
- [15] ZHAO Yan-mei, XIA Guang-qiong, WU Jia-gui, *et al.* Investigation of bidirectional dual-channel long-distance chaos secure communication based on 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21): 214206.
赵艳梅, 夏光琼, 吴加贵, 等. 基于 1550 nm 垂直腔面发射激光器的长距离双向双信道光纤混沌保密通信研究[J]. 物

- 理学报, 2013, **62**(21): 214206.
- [16] DENG Tao, WU Zheng-mao, XIE Yi-yuan, *et al.* Impact of optical feedback on current-induced polarization behavior of 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(16): 3833-3837.
- [17] PÉREZ P, QUIRCE A, VALLE A, *et al.* Photonic generation of microwave signals using a single-mode VCSEL subject to dual-beam orthogonal optical injection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(1): 5500614.
- [18] OHTSUBO J. *Semiconductor Lasers, Stability, Instability and Chaos*[M], 3rd ed. (Springer-Verlag, 2013).
- [19] HURTADO A, QUIRCE A, VALLE A, *et al.* Nonlinear dynamics induced by parallel and orthogonal optical injection in 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers(VCSELs) [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9423-9428.
- [20] PÉREZ P, QUIRCE A, PESQUERA L, *et al.* Polarization-resolved nonlinear dynamics induced by orthogonal optical injection in long-wavelength VCSELs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(5): 1228-1235.
- [21] PÉREZ P, LIN Hong, VALLE Á, *et al.* Polarization dynamics induced by orthogonal optical injection close to the lasing mode of a single-transverse-mode VCSEL[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2014, **31**(11): 2901-2907.
- [22] TORRE M, HURTADO A, QUIRCE A, *et al.* Polarization switching in long-wavelength VCSELs subject to orthogonal optical injection[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, **47**(1): 92-99.
- [23] DALY A, GRÜNDL T, HUBER S, *et al.* Voltage spectroscopy and the operating state of an optically injected long wavelength VCSEL[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(14): 1245-1247.
- [24] LIN Hong, PÉREZ P, VALLE A, *et al.* Investigation of elliptically polarized injection locked states in VCSELs subject to orthogonal optical injection[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(5): 4880-4885.
- [25] AL-SEYAB R, SCHIRES K, KHAN N A, *et al.* Dynamics of polarized optical injection in 1550-nm VCSELs: theory and experiments[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(5): 1242-1249.
- [26] AL-SEYAB R, SCHIRES K, HURTADO A, *et al.* Dynamics of VCSELs subject to optical injection of arbitrary polarization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, **19**(4): 1700512.
- [27] LI Xiao-feng, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Control of nonlinear dynamics in external-cavity VCSELs with delayed negative optoelectronic feedback[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2006, **30**(4): 1004-1011.
- [28] LIN Fan-yi, LIU Jia-ming. Nonlinear dynamics of a semiconductor laser with delayed negative optoelectronic feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **39**(4): 562-568.
- [29] WANG Xiao-fa. Polarization switching dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser subject to negative optoelectronic feedback[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(10): 104208. 王小发. 光电负反馈下垂直腔表面发射激光器偏振开关特性研究[J]. 物理学报, 2013, **62**(10): 104208.
- [30] XIE Yi-yuan, WU Zheng-mao, DENG Tao, *et al.* Nonlinear dynamics of 1550-nm VCSELs subject to positive optoelectronic feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(16): 1605-1608.
- [31] LIN Fan-yi, LIU Jia-ming. Nonlinear dynamics characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback [J]. *Optics Communications*, 2003, **221**: 173-180.
- [32] WANG An-bang, WANG Yun-cai, HE Hu-cheng. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1633-1635.
- [33] CHAN S C, LIU Jia-ming. Tunable narrow-linewidth photonic microwave generation using semiconductor laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(5): 1025-1032.
- [34] MARTIN-REGALADO J, PRATI F, SAN MIGUEL M, *et al.* Polarization properties of vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(5): 765-783.