

# 弱光反馈下正交时变光注入 VCSEL 的双稳特性研究

李小坚 吴正茂 邓 涛 郑安杰 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(VCSEL)的自旋反转模型(SFM),研究了弱光反馈下正交时变光注入 VCSEL 的双稳特性。研究表明,当副激光器(S-VCSEL)受到主激光器(M-VCSEL)正交时变光注入时,弱光反馈的引入不改变正交时变光注入 VCSEL 的双稳宽度随光注入扫描速率增大而增大的性质;对于确定的光注入扫描速率,随着反馈强度的增大,双稳宽度将变窄;当 M-VCSEL 与 S-VCSEL 之间存在频率失谐  $\Delta\nu$ (等于  $\nu^m - \nu^s$ ,  $\nu^m$ 、 $\nu^s$  分别为主、副激光器自由运行时的频率)时,随着  $\Delta\nu$  从负值逐渐增加到正值,双稳宽度总体呈现先减小后增大的趋势,无反馈时在负频区域双稳环宽度呈现的较大波动在引入光反馈后可得到一定程度的抑制。

**关键词** 激光器;垂直腔面发射激光器;正交时变光注入;弱光反馈;双稳

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1214001

## Investigation on the Bistability Performances of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers with Time-Varying Orthogonal Optical Injection Subject to Weak Optical Feedback

Li Xiaojian Wu Zhengmao Deng Tao Zheng Anjie Xia Guangqiong

(School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract** Based on the framework of the spin-flip model (SFM), the bistability performances of time-varying orthogonal optical injected vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) subject to weak optical feedback have been investigated theoretically. The results show that, for a slave VCSEL (S-VCSEL) subject to time-varying orthogonal optical injection from a master VCSEL (M-VCSEL), the introduction of weak optical feedback does not change the varied trend that hysteresis width increases with the increase of the sweeping rate of optical injection coefficient. For a fixed sweeping rate of the injection coefficient, with the increase of the feedback strength, the hysteresis width will narrow. Under the case that there exists frequency detuning  $\Delta\nu (= \nu^m - \nu^s)$ ,  $\nu^m$  and  $\nu^s$  are the free running frequencies of M-VCSEL and S-VCSEL, respectively) between the M-VCSEL and S-VCSEL, with the increase of  $\Delta\nu$  from negative value to positive value, the hysteresis width narrows firstly, and after reaching a minimum, widens finally. The obvious fluctuation of hysteresis width appearing in the negative frequency detuning region can be suppressed to some extent after introducing optical feedback.

**Key words** lasers; vertical-cavity surface emitting lasers (VCSEL); time-varying orthogonal optical injection; weak optical feedback; bistability

**OCIS codes** 140.7260; 190.1450; 190.3100

## 1 引 言

垂直腔表面发射激光器(VCSEL)<sup>[1~3]</sup>作为一

种新型的半导体激光器,具有低阈值电流、较大的调制带宽、圆形输出光斑、单纵模输出以及易于集成等

收稿日期: 2012-06-07; 收到修改稿日期: 2012-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(60978003, 61078003, 61178011, 61275116)和重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2012jjB40011)资助课题。

作者简介: 李小坚(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光与光通信方面的研究。E-mail: muzi198701@126.com

导师简介: 夏光琼(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事半导体激光、混沌保密通信等方面的研究。

E-mail: gqxia@swu.edu.cn(通信联系人)

特点,有望取代常规的边发射激光器(EEL)而成为光通信、光信号处理、光存储及光互连领域的关键器件。由于 VCSEL 的增益介质晶体存在弱的各向异性,这会导致明显的横磁(TM)模线性偏振的产生,因此 VCSEL 的偏振特性一直是人们关注的焦点。1995年,Miguel等<sup>[2]</sup>提出了自旋反转模型(SFM),较好地解释了 VCSEL 的偏振特性。通过改变 VCSEL 的工作参量,其输出的偏振模式可能会发生跳变,即产生偏振开关(PS)效应。如果偏振开关的位置随着参量变换路径的改变而有所变化,则称为偏振双稳<sup>[4]</sup>。

光注入、光反馈以及光电反馈等外部扰动常被引入到激光器中以改变激光器的输出特性,相关的研究已有大量的报道<sup>[5~7]</sup>。最近,通过引入这些外部扰动以实现 VCSEL 偏振双稳或者改变 VCSEL 偏振双稳特性也引起了人们的关注<sup>[8~15]</sup>,如 Xiang等<sup>[8]</sup>研究了 VCSEL 在偏振旋转光反馈下,通过沿不同方向改变偏振旋转角可产生偏振双稳,并给出了光反馈强度以及反馈时延对双稳特性的影响。Hong等<sup>[9]</sup>研究了 VCSEL 的偏置电流沿不同方向

扫描时引起的双稳现象并在理论和实验上证实了光反馈的引入将使双稳环的宽度变小,从而可抑制双稳环的产生。关于 VCSEL 在正交光注入下,通过改变注入参量而产生偏振双稳现象已有相关报道<sup>[12~15]</sup>。如 Yu等<sup>[12]</sup>从理论上研究了时变光注入下 VCSEL 的偏振双稳特性。Gatare等<sup>[14]</sup>报道了时变频率失谐下 VCSEL 的双稳特性<sup>[14]</sup>。值得注意的是,在现有的关于光注入 VCSEL 的偏振双稳特性的报道中,并未考虑到其同时受到光反馈作用的情形。而在实际应用过程中,VCSEL 通常需要与其他器件相连,因此连接中产生的弱光反馈通常是难以避免的。基于此,本文对弱光反馈下正交时变光注入 VCSEL 的偏振双稳特性进行研究,着重讨论弱光反馈对正交时变光注入 VCSEL 的双稳特性的影响。

## 2 理论模型

根据 VCSEL 的自旋反转模型<sup>[2]</sup>,并借鉴正交光注入<sup>[16]</sup>、弱光反馈<sup>[17]</sup>的处理方式,副激光器(S-VCSEL)的速率方程组为

$$\frac{dE_x^s}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N^s - 1)E_x^s + in^s E_y^s] - (\gamma_a + i\gamma_p)E_x^s + \eta_l E_x^s(t - \tau) \exp(-i2\pi\nu^s \tau) + \eta_x E_y^m \exp(i2\pi\Delta\nu t) + F_x, \quad (1)$$

$$\frac{dE_y^s}{dt} = k(1 + i\alpha)[(N^s - 1)E_y^s - in^s E_x^s] + (\gamma_a + i\gamma_p)E_y^s + \eta_l E_y^s(t - \tau) \exp(-i2\pi\nu^s \tau) + \eta_y E_x^m \exp(i2\pi\Delta\nu t) + F_y, \quad (2)$$

$$\frac{dN^s}{dt} = -\gamma[N^s - \mu + N^s(|E_x^s|^2 + |E_y^s|^2)] - i\gamma m^s(E_y^s E_x^{s*} - E_x^s E_y^{s*}), \quad (3)$$

$$\frac{dn^s}{dt} = -\gamma n^s - \gamma m^s(|E_x^s|^2 + |E_y^s|^2) - i\gamma N^s(E_y^s E_x^{s*} - E_x^s E_y^{s*}), \quad (4)$$

式中上标 m 与 s 分别代表主激光器(M-VCSEL)和副激光器,下标 x、y 分别为 X、Y 线性偏振模式, E 为光场的慢变振幅, N 为总载流子的密度, n 为两个自旋反转载流子密度的差值, k 为光场衰减率, γ 为总反转载流子衰减率, α 为线宽加强因子, γ<sub>s</sub> 为自旋反转速率, γ<sub>a</sub> 为线性色散效应, γ<sub>p</sub> 为双折射系数, μ 为归一化注入电流(阈值处 μ = 1), ν 为激光器的中心频率, η<sub>l</sub> 为反馈速率, η 为注入系数, τ 为 S-VCSEL 反馈延迟时间, Δν (等于 ν<sup>m</sup> - ν<sup>s</sup>, ν<sup>m</sup>、ν<sup>s</sup> 分别为主、副激光器自由运行时的频率)为两个激光器之间的频率失谐。(1)、(2)式中的自发辐射噪声项可分别表示为

$$F_x = \sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}}(\sqrt{N^s + n^s}\xi_1 + \sqrt{N^s - n^s}\xi_2), \quad (5)$$

$$F_y = -i\sqrt{\frac{\beta_{sp}}{2}}(\sqrt{N^s + n^s}\xi_1 - \sqrt{N^s - n^s}\xi_2), \quad (6)$$

式中 β<sub>sp</sub> 为自发辐射速率, ξ<sub>1</sub>、ξ<sub>2</sub> 为高斯白噪声,其平均值为 0,方差为 1。对于描述 M-VCSEL 的速率方程,只需在(1)~(4)式中,令 η<sub>x</sub> = η<sub>y</sub> = 0 和 η<sub>l</sub> = 0 即可得到。

## 3 结果与讨论

### 3.1 无频率失谐

利用四阶龙格-库塔法对速率方程组(1)~(4)式进行数值求解,数值仿真过程中主、副激光器参数

如下： $\alpha=3$ ,  $k=300 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma=1 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_a=0.5 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_p=30 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\gamma_s=50 \text{ ns}^{-1}$ ,  $\tau=3 \text{ ns}$ ,  $\beta_p=10^{-6} \text{ ns}^{-1}$ ,  $2\pi\nu=2.2176 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ (对应 VCSEL 的中心波长为  $850 \text{ nm}$ )。在上述参数条件下自由运行 VCSEL 的功率-电流 ( $P-I$ ) 曲线如图 1 所示。当  $\mu=1.5$ , VCSEL 稳定工作在 X 偏振, 此时 S-VCSEL 只存在一个模式, 相应的输出强度  $|E_y^m|^2=0$ ,  $|E_x^m|^2=0.49$ 。在下面的讨论中, 假定 M-VCSEL 以及 S-VCSEL 的归一化电流  $\mu$  均为 1.5。

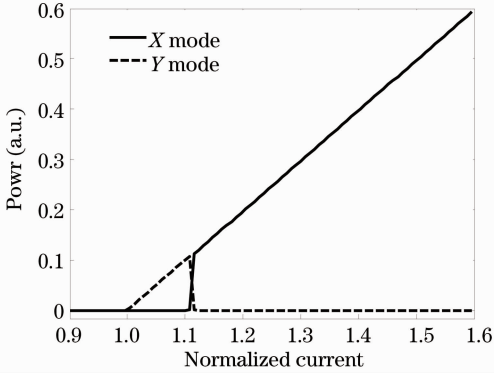


图 1 自由运行时 VCSEL 的功率-电流曲线

Fig. 1 Polarization-resolved  $P-I$  curve for a free-running VCSEL

在上述给定的参数条件下, 从 M-VCSEL 输出的、偏振方向沿 X 方向的线偏振光, 经过旋转  $90^\circ$  后正交注入到 S-VCSEL。当注入系数在时间间隔  $T$  内逐渐由 0 增大到  $30 \text{ ns}^{-1}$  (正向扫描) 时, S-VCSEL 输出将发生偏振开关 (PS), 即由 X 偏振转化为 Y 偏振; 当注入系数再以同样的扫描速率 (等于  $|d\eta/dt|$ ) 从  $30 \text{ ns}^{-1}$  减小到 0 (反向扫描) 时, 将再次发生 PS。如果发生偏振开关的位置与正向扫描时发生偏振开关的位置有所变化, 则说明存在偏振双稳。此时正反向扫描 PS 位置对应的注入系数差值  $\Delta\eta_{inj}$  ( $\Delta\eta_{inj}=\eta_{inj1}-\eta_{inj2}$ , 其中  $\eta_{inj1}$ 、 $\eta_{inj2}$  分别表示正、反向扫描 PS 位置对应的注入系数) 定义为双稳宽度。另外, 考虑到实际探测过程中探测器总是具有一定的响应时间<sup>[9]</sup>, 因此在仿真过程中输出强度是对  $T/50$  的时间窗口进行平均后得到的结果。

图 2 给出了  $\eta_f=0$  (左列)、 $\eta_f=1 \text{ ns}^{-1}$  (右列) 时, S-VCSEL 输出的 X 偏振光强度随注入系数的变化曲线, 其中图 2(a), (b), 图 2(c), (d), 图 2(e), (f) 分别对应  $T=90, 180, 360 \text{ ns}$ 。图 2 中的归一化强度定义为

$$I_x^s = |E_x^s|^2 / (|E_x^s|^2 + |E_y^s|^2),$$

$$I_y^s = |E_y^s|^2 / (|E_x^s|^2 + |E_y^s|^2).$$

考虑到  $I_x^s + I_y^s = 1$ , 即归一化后 X 模与 Y 模的强度在坐标系中是互补的, 因此在讨论过程中我们只讨论 X 偏振模式。从图 2 中可以看出: 在无光反馈条件下, 随着注入系数扫描时间的增加 (即扫描速率的减小) 双稳宽度将会逐渐减小。这一变化规律对于  $\eta_f=1 \text{ ns}^{-1}$  仍然成立, 然而此时输出功率出现了起伏, 这是因为在光反馈作用下正向扫描 PS 附近输出呈现复杂的运动状态 (如混沌态) 所导致。

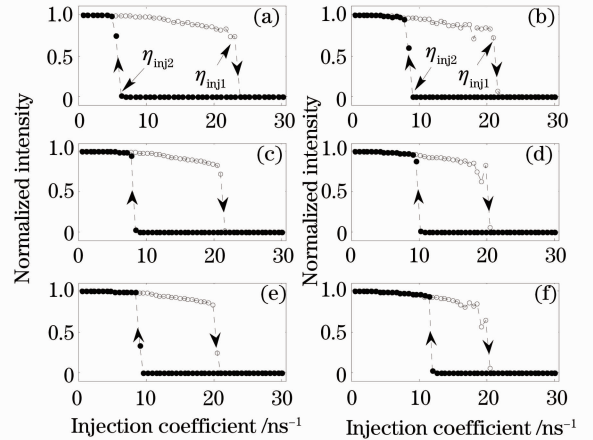


图 2  $\eta_f=0 \text{ ns}^{-1}$  (左列)、 $\eta_f=1 \text{ ns}^{-1}$  (右列) 时 S-VCSEL 输出的归一化 X 偏振光强度随注入系数变化的曲线, 其中空心 (实心) 圆圈表示注入系数逐渐增加 (减小) 的情形, (a)~(f) 分别对应  $T=90, 180, 360 \text{ ns}$

Fig. 2 Normalized intensity of X polarized mode of S-VCSEL as a function of the injection coefficient for  $\eta_f=0 \text{ ns}^{-1}$  (left column),  $\eta_f=1 \text{ ns}^{-1}$  (right column), where the open (close) circles are for the case of increasing (decreasing)  $\eta_b$ , and (a)~(f) correspond to  $T=90, 180, 360 \text{ ns}$ , respectively

为进一步说明弱光反馈对正交时变光注入 VCSEL 的偏振双稳特性的影响, 图 3 给出了注入系数扫描时间  $T=90 \text{ ns}$  (对应扫描速率为  $1/3 \text{ GHz/ns}$ ) 时, 反馈速率  $\eta_f$  取不同值时 S-VCSEL 的 X 模式归一化输出强度随注入系数的变化。随着反馈速率的增大, 正交时变光注入下 VCSEL 偏振双稳环宽度将呈现逐渐变窄的趋势, X 模双稳环正向扫描跳变过程将变得更为平滑。

图 4 进一步分析了当反馈速率在  $0 \sim 2 \text{ ns}^{-1}$  区间变化时, 不同扫描时间下双稳宽度随反馈速率的变化关系曲线。从图 4 中可以看出: 当扫描时间较小的时候 (如  $T=50 \text{ ns}$ ), 随着反馈强度的增大, 双稳环的宽度会在一个常数值附近波动; 而当扫描周期较大时, 随着反馈强度的增大, 双稳环的宽度总体将呈现减小的趋势, 且扫描周期越大, 下降得越快。

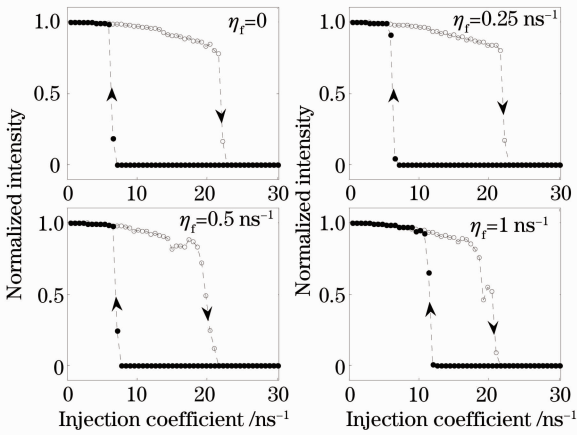


图 3  $T=90$  ns 时,不同光反馈速率下 S-VCSEL 输出的 X 模归一化输出强度随注入系数的变化关系

Fig. 3 Normalized intensity of X polarized mode of S-VCSEL as a function of the injection coefficient for different feedback rates with  $T=90$  ns

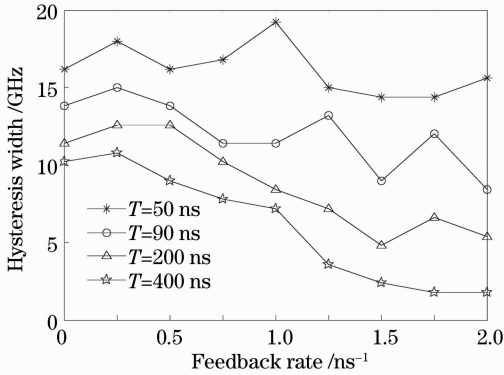


图 4 不同扫描周期  $T$  下,双稳宽度随反馈速率的变化关系曲线

Fig. 4 Hysteresis width versus feedback rate for different sweeping periods  $T$

### 3.2 存在频率失谐

已有的报道说明光注入产生的双稳会受到主、副激光器之间的频率失谐的影响<sup>[14,15]</sup>,因此下面考虑主、副 VCSEL 之间存在频率失谐的情形。图 5 给出了扫描速率为  $1/3$  GHz/ns、频率失谐取不同值时,S-VCSEL 输出强度随注入系数的变化,图 5 中左列对应  $\eta_r=0$  ns<sup>-1</sup>、右列对应  $\eta_r=1$  ns<sup>-1</sup>。随着频率失谐从负值增加到正值,双稳环宽度呈现先减小后增加的趋势。当主、副 VCSEL 存在频率失谐时,弱光反馈的影响与频率失谐的大小有关。

图 6 给出了不同的反馈强度下,双稳环宽度随频率失谐的变化曲线。当反馈速率为 0(无光反馈)时,随着频率失谐从负值增加到正值,双稳环宽度总体呈现先减小后增加的趋势;频率失谐在 8 GHz 左右,双稳环宽度达到最小值,在  $-2 \sim -12$  GHz 的

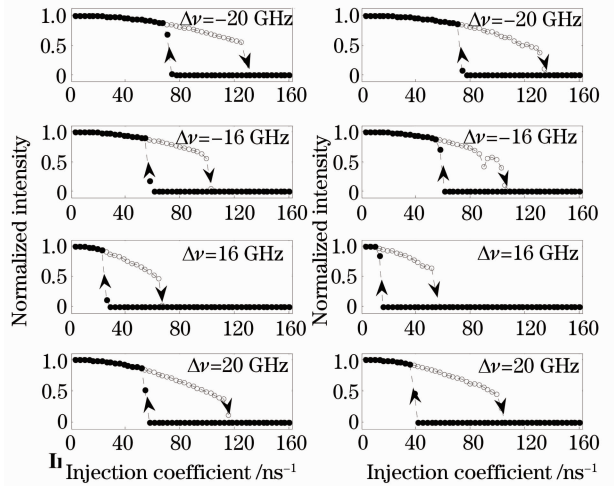


图 5 扫描速率为  $1/3$  GHz/ns 时,不同频率失谐下 S-VCSEL 的 X 模归一化输出强度随注入系数的变化,其中左列: $\eta_r=0$  ns<sup>-1</sup>;右列: $\eta_r=1$  ns<sup>-1</sup>

Fig. 5 Normalized intensity of X polarized mode as a function of the injection coefficient for  $1/3$  GHz/ns sweeping rate and different frequency detuning values, where the left and right columns are for  $\eta_r=0$  and  $1$  ns<sup>-1</sup>, respectively

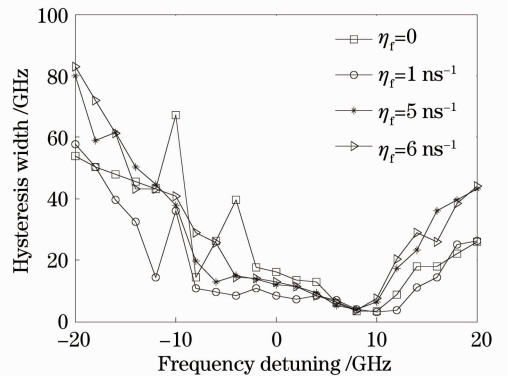


图 6 扫描速率为  $1/3$  GHz/ns、反馈速率取不同值时 S-VCSEL 双稳区宽度随频率失谐的变化关系曲线

Fig. 6 Hysteresis loop width versus frequency detuning for  $1/3$  GHz/ns sweeping rate and different feedback rates

频率失谐范围内双稳环的宽度呈现较大的波动;当存在反馈时,双稳环的宽度随频率失谐的变化总体呈现与无反馈时相同的趋势,反馈的引入使双稳环宽度在负频率失谐区域呈现的波动趋于平滑。

## 4 结 论

基于自旋反转模型,理论上分析了存在弱光反馈时正交时变光注入下 VCSEL 双稳特性。研究结果表明,无论有无光反馈,随着扫描速率的增加双稳环宽度都将增大。而在一定的光注入扫描速率下,随着反

馈强度的增大双稳环的宽度呈逐渐减小的趋势；主、副 VCSEL 之间的频率失谐对 S-VCSEL 的双稳特性有较大的影响。当频率失谐从负失谐到正失谐逐渐增大时，双稳环宽度总体呈现先减小后增大的趋势。无反馈时在频率失谐处于  $-12 \sim -2$  GHz 区域双稳环宽度呈现较大的波动，而反馈的引入可使这一区域的波动得到抑制。因此，通过控制时变光注入系数的扫描速率、光反馈的反馈系数以及主、副 VCSEL 之间的频率差异，可对 S-VCSEL 输出偏振双稳区的大小以及偏振开关出现的位置进行调控。

### 参 考 文 献

- 1 K. Iga. Surface-emitting laser-its birth and generation of new optoelectronics field [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6): 1201~1215
- 2 M. S. Miguel, Q. Feng, J. V. Moloney. Light-polarization dynamics in surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(2): 1728~1739
- 3 S. Bandyopadhyay, Y. Hong, P. S. Spencer *et al.*. VCSEL polarization control by optical injection [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 765~783
- 4 H. Kawaguchi. Bistable laser diodes and their applications: state of the art [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(5): 1254~1270
- 5 S. L. Yan. Studies on bifurcation and period in semiconductor laser due to optical injection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 996~1001  
颜森林. 光注入半导体激光器分岔与周期研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 996~1001
- 6 M. J. Zhang, T. G. Liu, J. Y. Zheng *et al.*. Demonstration of ultrawideband chaotic signal generating utilizing external feedback laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405002  
张明江, 刘铁根, 郑建宇等. 利用光反馈半导体激光器产生超宽带混沌脉冲信号 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405002
- 7 L. P. Chao, T. Deng, X. D. Lin *et al.*. Investigation on nonlinear dynamic behaviors of the distributed feedback semiconductor laser subjected to optical feedback [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 939~943

- 操良平, 邓涛, 林晓东等. 光反馈分布反馈半导体激光器的非线性动力学动态行为 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 939~943
- 8 S. Y. Xiang, W. Pan, L. S. Yan *et al.*. Variable-polarization optical feedback induced hysteresis of the polarization switching in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(12): 2512~2517
- 9 Y. H. Hong, R. Ju, P. S. Spencer *et al.*. Investigation of polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers subjected to optical feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(5): 619~624
- 10 X. J. Yan, G. Q. Xia, J. G. Wu *et al.*. Polarization bistability characteristics of optical feedback vertical-cavity surface-emitting lasers after taking into account multiple trip external optical feedback [J]. *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 2008, **10**(10): 2502~2506
- 11 X. B. Huang, G. Q. Xia, Z. M. Wu. Polarization bistability characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with negative optoelectronic feedback subject to time-varying current [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **59**(5): 3066~3069  
黄雪兵, 夏光琼, 吴正茂. 时变电流注入下光电负反馈垂直腔表面发射激光器的偏振双稳特性 [J]. *物理学报*, 2009, **59**(5): 3066~3069
- 12 S. F. Yu. Theoretical analysis of polarization bistability in vertical cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 1032~1040
- 13 Z. G. Pan, S. Jiang, M. Dagenais *et al.*. Optical injection induced polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(22): 2999~3001
- 14 I. Gatare, K. Panajotov, M. Sciamanna. Frequency-induced polarization bistability in vertical-cavity surface-emitting lasers with orthogonal optical injection [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 023804
- 15 W. L. Zhang, W. Pan, B. Luo *et al.*. Polarization switching and hysteresis of VCSEL with time-varying optical injection [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(3): 889~893
- 16 A. Valle, I. Gatare, K. Panajotov *et al.*. Transverse mode switching and locking in vertical-cavity surface-emitting lasers subject to orthogonal optical injection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(4): 322~333
- 17 X. F. Wang, G. Q. Xia, Z. M. Wu. Theoretical investigations on the polarization performances of current-modulated VCSEL subject to weak optical feedback [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(1): 160~168

栏目编辑：宋梅梅