

文章编号: 0258-7025(2004)12-1450-05

多次外光反馈下垂直腔面发射激光器 非线性动态特性理论研究

李孝峰¹, 潘 炜¹, 罗 斌¹, 邓 果¹, 赵 峥²

(西南交通大学¹ 计算机与通信工程学院,² 理学院, 四川 成都 610031)

摘要 在 SIMULINK 平台下建立了垂直腔面发射激光器(VCSEL)动态仿真模型,利用该模型对多次外光反馈下垂直腔面发射激光器的非线性行为进行了研究。结果表明,短外腔时,光子密度随外腔长呈周期为半激光波长的余弦关系;长外腔时,随外腔长增加,垂直腔面发射激光器依次经历混沌、多周期、倍周期和单周期区域,增大外腔反射率时同样存在这些非线性区域,但出现顺序相反。进一步得出:考虑单次反馈时由于忽略了占有较多能量的高次反馈导致上述非线性效应偏弱;增大自发辐射因子或减小线性展宽因子可抑制系统的非线性行为。

关键词 激光技术;垂直腔面发射激光器;非线性动态特性;混沌;外光反馈

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Theoretical Study on Nonlinear Dynamics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser with Multiple External Optical Feedbacks

LI Xiao-feng¹, PAN Wei¹, LUO Bin¹, DENG Guo¹, ZHAO Zheng²

(¹Department of Computer and Communication Engineering, ²Department of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract The model of the vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is established using SIMULINK and the nonlinear behaviors of VCSEL with multiple external optical feedbacks are studied using this model. For short external cavities, the photon density shows periodic cosine undulation along the external cavity length whose period is equal to half of the lasing wavelength; for relatively long external cavities, VCSEL undergoes the regions of chaos, multiple, double and single period orderly with increasing the length of the external cavity, however, these regions emerge contrarily with increasing the external cavity's reflectivity. If only the first feedback is taken into account, the nonlinearity is weaker than the multiple feedbacks case due to neglecting the high-order feedbacks that own a lot of energy. It is also shown that the nonlinear behaviors can be constrained by increasing the spontaneous emission factor or decreasing the linewidth broadening factor.

Key words laser technique; VCSEL; nonlinear dynamics; chaos; external optical feedback

1 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)在光通信、光互连和光存储等领域应用广泛。在这些应用中,光纤耦合端面、光连接器或光盘等界面总会将垂直腔面

发射激光器输出的部分能量反射回谐振腔内使器件呈现出丰富的非线性效应,因而深入剖析外光反馈对垂直腔面发射激光器的影响颇为重要。不少学者对此进行了研究并获得了许多有益的结论,如:S. J. Jiang 等从实验得知反馈会使阈值降低、谱线展

收稿日期:2003-07-12;收到修改稿日期:2003-10-08

基金项目:国家自然科学基金(10174057,90201011)和宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室开放课题(2002KF)资助项目。

作者简介:李孝峰(1979—),男,四川威远人,西南交通大学博士研究生,主要从事半导体激光器和光通信的研究。
E-mail: xfl79@163.com

宽并出现外腔模^[1]; G. P. Agrawal 等从横模角度分析了它对器件动静态特性的影响^[2]; L. N. Langley 等指出外光反馈会引起相对强度噪声 (RIN) 变大^[3], 等等。在处理外光反馈问题时, 对于端面反射率较低的边发射激光器 (EEL) (强耦合^[4]) 而言通常只考虑一次反馈, 而对使用高反射镜的垂直腔面发射激光器 (弱耦合) 来说, 高次反馈占有较多能量而不能忽略, 故有必要对多次外光反馈下垂直腔面发射激光器的非线性行为作更为深入的研究。

本文基于前期工作^[5], 试图在 SIMULINK 平台开发一个多次外光反馈垂直腔面发射激光器动态仿真模型, 借以研究短外腔和长外腔时垂直腔面发射激光器的非线性动态特性, 并与一次反馈结果进行比较。最后, 将以自发辐射因子和线性展宽因子作为调控参数来分析垂直腔面发射激光器反馈敏感度的变化规律。

2 基本理论

为研究方便, 构建了包括外腔的垂直腔面发射激光器模型, 如图 1 所示。垂直腔面发射激光器上下两个反射镜为分布布拉格反射结构 (DBR), 其间为多量子阱有源区, 内腔长为 L_{in} , 从顶层 DBR (等效反射率为 R_2) 输出的光被距离该面 L_{ext} 处、反射率为 R_{ext} 的外腔镜面反射回来, 部分进入内腔形成一次反馈, 余下部分被顶层 DBR 反射回外腔后, 部分再被反射回内腔构成第二次反馈, 如此往复, 最终存在多次反馈。

与边发射激光器类似, 反馈参数 k_m 定义如

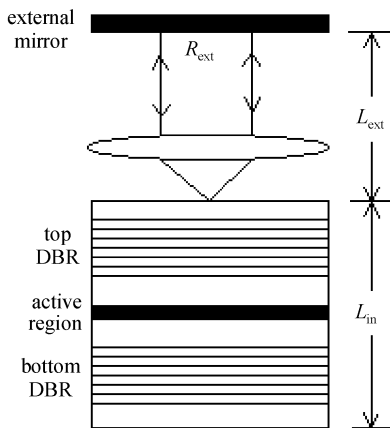


图 1 外光反馈下垂直腔面发射激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram for VCSEL with external optical

下^[2,6]

$$k_m = \frac{1 - R_2}{\tau_L R_2} (R_{ext} R_2)^{m/2} \quad (1)$$

其中 m 为反馈次数, $\tau_L = 2L_{in}/c$ 为激光在内腔中往返一次的时间, c 为真空中的光速。由于式 (1) 中 R_{ext} 和镜面反射系数 R_2 均小于 1, 因而 m 增大时对应反馈强度将成比例地减弱, 例如, R_{ext} 取光纤端面的典型反射率 4%^[2], R_2 取 99.7%, 简单计算可得 $k_1 \approx 5k_2 \approx 25k_3$, 可见第三次以上反馈可忽略 (仿真中均考虑三次)。

数学上, 上述模型通常采用速率方程来描述^[2,3,6]。这里以文献 [6] 给出的外光反馈单模速率方程为基础, 由于顶层 DBR 处总反射场为多次反馈叠加^[7], 故需将反馈项写为求和形式, 最终得到如下方程组

$$\begin{aligned} \frac{dP(t)}{dt} = & (G - \gamma)P(t) + \beta_{sp}BN(t)^2 + \\ & 2 \sum_{m=1}^3 k_m [P(t)P(t - m\tau)]^{0.5} \times \\ & \cos[\omega_0 \tau + \Phi(t) - \Phi(t - m\tau)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_e} - GP(t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi(t)}{dt} = & \frac{1}{2}\beta_e(G - \gamma) - \sum_{m=1}^3 k_m \left[\frac{P(t - m\tau)}{P(t)} \right]^{0.5} \times \\ & \sin[\omega_0 \tau + \Phi(t) - \Phi(t - m\tau)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $P(t)$, $N(t)$ 和 $\Phi(t)$ 分别为 t 时刻的光子密度、载流子密度和相位, $\gamma = V_g \alpha$ 为光子衰减速率, $\tau = 2L_{ext}/c$ 为激光在外腔中往返一次的时间, ω_0 为阈值附近振荡频率, $V = \pi\omega^2 d$ 为有源区体积, 其他参数见表 1。

考虑到垂直腔面发射激光器的增益饱和效应及有源区的应变量子阱结构, 增益 G 可以表示为如下广义对数形式^[8]

$$G = \Gamma_L \Gamma_z V_g \alpha_N \frac{\log[N(t)/N_0]}{1 + \epsilon_{NL} P(t)} \quad (5)$$

其中 Γ_L 和 Γ_z 分别为侧向和纵向光场限制因子, α_N 为增益系数, N_0 为透明载流子密度, ϵ_{NL} 为增益压缩因子。

基于速率方程的 SIMULINK 模型如图 2 所示, 自上而下分别对应光子密度方程、载流子密度方程和相位方程。针对三次反馈情况, 分别使用了三个延时器来实现光子密度和相位的延时, 这些延时信号和未延时信号的部分或全部经混合器 MUX 合为一并进入函数组件 $f(u)$ 中作特定运算, 分别形成速率方程右侧的各部分表达式, 最后将各表达式

通过加法器衔接和时域积分器 $1/S$ 积分以形成相应的速率方程。模型运行以及输出数据的处理均由外部程序来进行,便于得到各种适时动态结果。该模型主要特点在于采用可视化方式、计算精度高、参数修改容易以及可拓展性强,适用于器件多种特性的仿真。

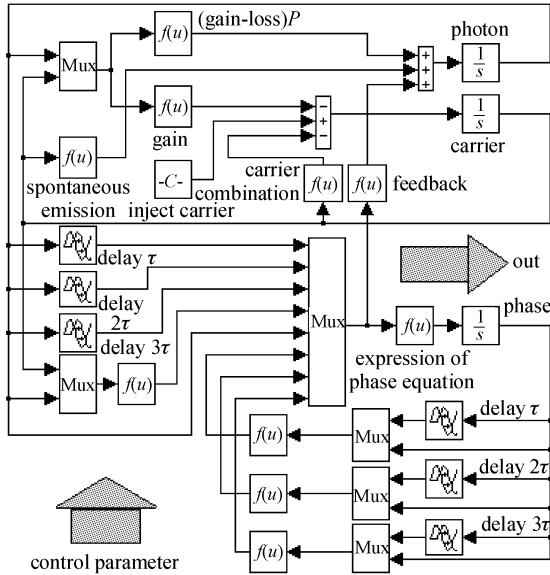


图 2 三次外光反馈垂直腔面发射激光器 SIMULINK 模型图

Fig. 2 Diagram of VCSEL SIMULINK model with three external optical feedbacks

表 1 模拟中使用的垂直腔面发射激光器参数
Table 1 VCSEL parameters used in simulations

Parameter and symbol	Value
Lasing wavelength λ_0	$0.98 \mu\text{m}$
Thickness of active region d	$0.4 \mu\text{m}$
Radius of device W	$5 \mu\text{m}$
Lateral confinement factor Γ_L	1.0
Longitudinal confinement factor Γ_z	0.07
Group velocity V_g	$8.1 \times 10^9 \text{ cm/s}$
Linewidth broadening factor β_c	4.8
Carrier density at transparency N_0	$1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Spontaneous emission factor β_{sp}	1×10^{-4}
Radiative recombination rate B	$1 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$
Mirror reflectivities R_1, R_2	0.997
Solitary-laser round-trip time τ_L	0.04 ps
Equivalent cavity loss α	50 cm^{-1}
Gain suppression factor ϵ_{NL}	$1 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$
Carrier lifetime at threshold τ_c	2.7 ns
Gain coefficient a_N	$1.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$
Bias current I	9 mA

3 结果及讨论

在下面的模拟计算中,除特别指明外均采用表 1 中的参数。

3.1 短外腔情况

垂直腔面发射激光器用于光存储或与光纤耦合端面间空间间隔较小时视为该情况,此时外腔长通常只有几十微米^[2]。图 3(a)示出了外腔长在 $20 \sim 22 \mu\text{m}$ 范围内光子密度 P 的变化曲线。图 3 中实线和虚线分别为多次和单次反馈情况。由于反馈光与内腔中激光是相加还是相消取决于由外腔长决定的多次和单次反馈的相位差,故 P 与 L_{ext} 呈图 3(a) 所示的周期为 $\lambda_0/2$ 的余弦关系,且 P 较垂直腔面发射激光器独立工作时可产生 15% 左右的偏移。图 3 (b) 和 (c) 分别为多次和单次反馈同相和反相时 (L_{ext} 分别为 $49 \mu\text{m}$ 和 $48.775 \mu\text{m}$) 的 $P-R_{\text{ext}}$ 曲线,可见,同相时 P 随 R_{ext} 增加而增大,反相时随之逐渐减小。由于垂直腔面发射激光器输出功率与光子密度成正比,故输出功率同外腔长和外腔反射率亦有类似关系。

对比图 3 实线和虚线可看到,虽然二者变化趋势相同,但后者(单次反馈)忽略了占较多能量的高次反馈使变化幅度小于前者,且 R_{ext} 越大该差值越大,也即单次反馈处理法准确度越低。

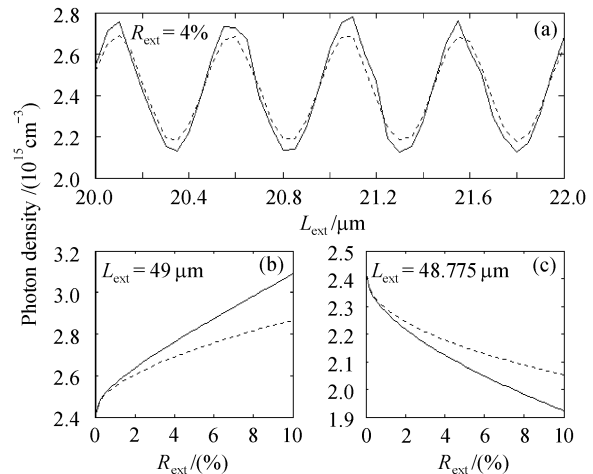


图 3 光子密度随(a)外腔长及(b),(c)外腔反射率变化曲线

实线:多次反馈;虚线:单次反馈

Fig. 3 Photon density versus (a) external cavity length and (b), (c) external mirror reflectivity

solid line; multiple feedbacks; dashed line; single feedback

3.2 长外腔情况

垂直腔面发射激光器应用于光互连或光探测领

域时外腔长一般可达 $1 \sim 2 \text{ cm}^{[2]}$ (长外腔), 此时其动态特性与短外腔情况有明显差别^[9]。图 4(a) 展示了多次反馈时垂直腔面发射激光器的 $P-\Delta L_{\text{ext}}$ 分岔图 ($\Delta L_{\text{ext}} = L_{\text{ext}} - 15000 \text{ }\mu\text{m}$), 其中 R_{ext} 为 4%, 由于其纵坐标包括峰值和极小光子密度, 因而图示周期数扩大了一倍(下同)。可以看到, 随外腔长增加, 垂直腔面发射激光器顺次经历了混沌 ($0.245 \text{ }\mu\text{m} < \Delta L_{\text{ext}} < 0.46 \text{ }\mu\text{m}$), 四周期 ($0.46 \text{ }\mu\text{m} < \Delta L_{\text{ext}} < 0.52 \text{ }\mu\text{m}$), 倍周期 ($0.52 \text{ }\mu\text{m} < \Delta L_{\text{ext}} < 0.575 \text{ }\mu\text{m}$) 和单周期 ($0.575 \text{ }\mu\text{m} < \Delta L_{\text{ext}} < 0.74 \text{ }\mu\text{m}$) 区域, 当 ΔL_{ext} 大于 $0.74 \text{ }\mu\text{m}$ 时又突然进入混沌区。在这些区域中垂直腔面发射激光器的输出将表现出不同的光学特性, 混沌态下输出功率体现出随机性, N 周期态时周期性地输出 N 个不同峰值功率的光脉冲。特别地, ΔL_{ext} 在 $0.704 \sim 0.74 \text{ }\mu\text{m}$ 范围时峰值和极小光子密度相等, 垂直腔面发射激光器输出恒定的光功率。各区域对应的典型相图 ($P-N$ 曲线) 见图 5, 可见, 图 5(a)~(d) 分别呈现混沌、四周期、倍周期和单周期态, 与图 4(a) 完全吻合。需要指出的是, L_{ext} 增大使非线性效应增强、混沌带逐渐变宽 (如图 4), 故以上变化过程不呈周期性。

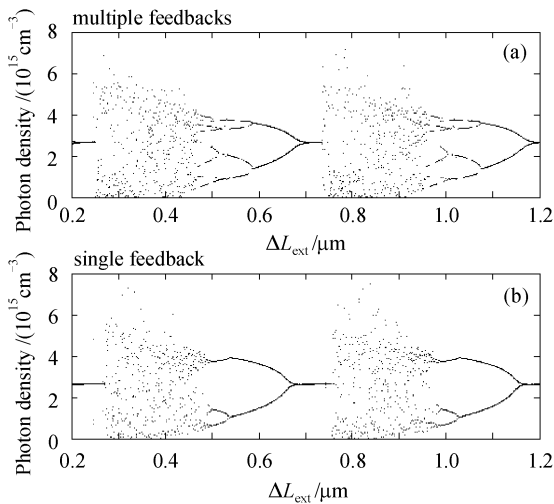


图 4 外腔长变化时光子密度分岔图
Fig. 4 Bifurcation diagrams of photon density versus external cavity length

单次反馈情况见图 4(b), 对比图 4(a) 可看到, 混沌区变窄并向长外腔方向移动, 四周期区变模糊, 功率恒定区变长, 表明此时的非线性效应较多次反馈时弱, 物理原因在于忽略了高次反馈导致对反馈强度估计过小。

不仅 P 随 L_{ext} 存在上述非线性行为, 在 L_{ext} 固

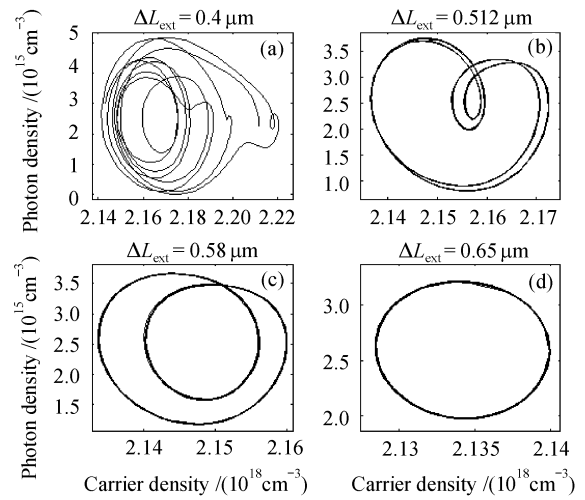


图 5 不同外腔长时的相图

Fig. 5 Phase diagrams at different external cavity length

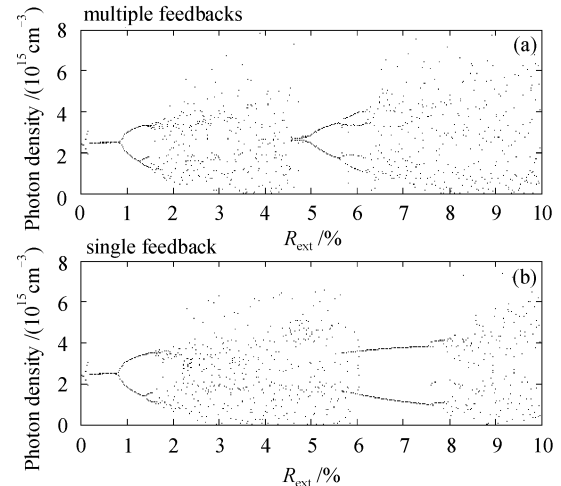


图 6 外腔反射率变化时光子密度分岔图

Fig. 6 Bifurcation diagrams of photon density versus external mirror reflectivity

定、改变 R_{ext} 时也有类似关系^[10], 图 6 示出了 L_{ext} 为 2 cm 时的 $P-R_{\text{ext}}$ 分岔图。如图 6(a) 所示, 该图与图 4(a) 不同之处在于垂直腔面发射激光器经历前述非线性区域的顺序相反, 以 R_{ext} 从 0 增大到 5% 为例, 各区域顺次为单周期 ($0 < R_{\text{ext}} < 1.24\%$), 倍周期 ($1.24\% < R_{\text{ext}} < 1.46\%$), 四周期 ($1.46\% < R_{\text{ext}} < 1.52\%$) 和混沌 ($1.52\% < R_{\text{ext}} < 4.58\%$) 区, 之后又进入单周期区。 R_{ext} 继续增大时将重复上述过程, 但该变化同样没有周期性。从图 6(b) 可以看到, 若不考虑高次反馈, 得出的分岔图将有较大差别, 特别在 $14.2\% < R_{\text{ext}} < 17.0\%$ 左右时仍然存在单周期态, 而图 6(a) 中该区域已完全为混沌态了, 印证了短外腔部分的结论。

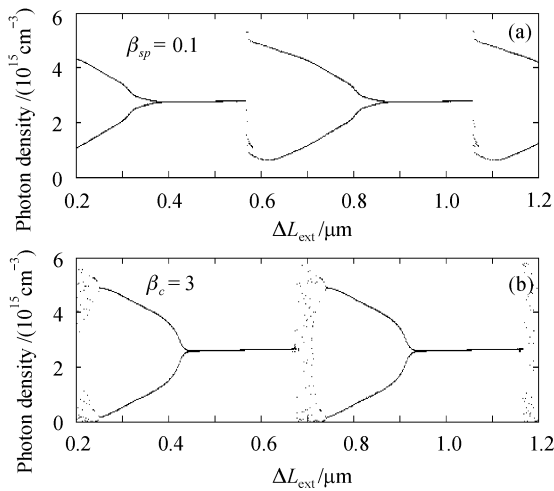


图 7 外腔长变化时光子密度分岔图

Fig. 7 Bifurcation diagrams of photon density versus external cavity length

文献[9]指出,自发辐射因子越大或线性展宽因子越小时,边发射激光器对外光反馈的敏感度越低。图 7(a)和(b)分别为自发辐射因子为 0.1 和线性展宽因子为 3 时垂直腔面发射激光器的 $P-\Delta L_{\text{ext}}$ 分岔图,对比图 4(a)可见,此时混沌区域几乎消失,功率恒定区变宽,即反馈引起的非线性效应减弱。由于微腔效应使自发辐射因子得到增大^[11],故有望利用该效应来抑制外光反馈给垂直腔面发射激光器带来的不利影响,提高器件性能。

从上面分析可看出,长外腔时垂直腔面发射激光器动态特性相比短外腔时存在较大差异,其物理原因如下:短外腔时外腔模间距 $\Delta\nu_{\text{ext}}$ 小于弛豫振荡频率 f_R ,反馈对弛豫振荡的衰减过程影响很小,光子密度能趋于恒定值,此时垂直腔面发射激光器的输出主要由反馈相位决定;增加外腔长使 $\Delta\nu_{\text{ext}}$ 高于 f_R 时,弛豫振荡受到较大影响,光子密度不再趋于恒定值,这种内外腔模间的竞争便导致了自脉冲、多稳和混沌等非线性现象。

4 结 论

经研究表明,利用 SIMULINK 处理外光反馈下垂腔面发射激光器动态特性一类问题是行之有效的。使用该模型得出:短外腔时,光子密度(输出功率)随外腔长以周期为半激光波长的余弦形式变化,当反射光与内腔中激光同/反相时光子密度随外腔反射率增加而增大/减小,仅考虑单次反馈时对反馈强度的过小估计将导致上述变化幅度偏小;长外

腔情况下,增加外腔长时垂直腔面发射激光器顺次经历混沌、四周期、倍周期和单周期区域,增大外腔反射率时同样存在上述非线性区域,但出现顺序相反,与短外腔情况类似,单次反馈处理时非线性效应较多次反馈时弱;增大自发辐射因子或减小线性展宽因子可抑制外光反馈引起的非线性效应。综上所述,对于垂直腔面发射激光器而言,仅考虑外腔一次反馈不能很好反映器件的实际情况,需考虑多次反馈。本文结果与文献实验结果拟合较好^[2,9,10,12~14]。

参 考 文 献

- 1 S. J. Jiang, Z. Q. Pan, M. Dagenais *et al.*. Influence of external optical feedback on threshold and spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1):34~36
- 2 J. Y. Law, G. P. Agrawal. Effects of optical feedback on static and dynamic characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(2):353~358
- 3 L. N. Langley, K. A. Shore. Effect of optical feedback on the noise properties of vertical cavity surface emitting lasers [J]. *IEE Proc.-Optoelectron.*, 1997, **144**(1):34~38
- 4 Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin *et al.*. Effect of wavelength dependence of reflectivity at AR-coating facets on tuning range of external-cavity semiconductor lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):975~979
潘 伟,张晓霞,罗 斌等. 端面反射率的波长特性对外腔半导体激光器调谐范围的影响[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):975~979
- 5 Deng Guo, Pan Wei, Luo Bin. Influence of spontaneous emission factor on the bifurcation and chaos behavior of VCSEL under large signal modulation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):293~296
邓 果,潘 伟,罗 斌. 自发辐射因子对 VCSEL 在大信号调制下的分岔及混沌行为的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):293~296
- 6 G. P. Agrawal, N. K. Dutta. *Semiconductor Lasers* [M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. 231~311
- 7 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **QE-16**(3):347~355
- 8 S. F. Yu, W. N. Wong, P. Shum *et al.*. Theoretical analysis of modulation response and second-order harmonic distortion in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(12):2139~2147
- 9 A. T. Ryan, G. P. Agrawal, G. R. Gray *et al.*. Optical-feedback-induced chaos and its control in multimode semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(3):668~679
- 10 N. Kikuchi, Y. Liu, J. Ohtsubo. Chaos control and noise suppression in external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(1):56~65
- 11 Guo Changzhi, Chen Shuiliang. On microcavity effect in vertical cavity surface emitting quantum well laser with multilayer heterostructure reflectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**(9):1731~1743
郭长志,陈水莲. 分布反射面发射垂直微腔半导体激光器的微腔效应[J]. *物理学报*, 1997, **46**(9):1731~1743
- 12 J. Mork, B. Tromborg, J. Mark. Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1):93~108
- 13 A. Hsu, J.-F. P. Seurin, S. L. Chuang *et al.*. Optical feedback in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(12):1643~1649
- 14 R. J. Jones, P. S. Spencer, J. Lawrence *et al.*. Influence of external cavity length on the coherence collapse regime in laser diodes subject to optical feedback [J]. *IEE Proc.-Optoelectron.*, 2001, **148**(1):7~12