

文章编号: 0258-7025(2004)03-0293-04

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

邓 果^{1,2}, 潘 炜^{1,2}, 罗 斌¹

¹ 西南交通大学计算机与通信工程学院, 四川 成都 610031
² 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 在 SIMULINK 平台下开发了垂直腔面发射激光器(VCSEL)的动态仿真模型, 实施高频大信号调制情形下的动态仿真, 避免了大信号近似处理, 提高了计算精度。选择自发辐射因子为控制参量, 定量分析它对 VCSEL 稳定性和分岔点的影响。结果表明, 在所选参量条件下, 自发辐射因子数值在 $5 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-5}$ 之间时, 随着调制深度的加深, VCSEL 峰值光子密度产生分岔, 呈现双稳、多周期, 最后回到单周期; 当小于 10^{-5} 时, 进入混沌状态的演变过程。同时分岔点的移动依赖于自发辐射因子的大小, 调控自发辐射因子可以抑制系统的非线性行为。仿真结果与文献实验结果吻合。

关键词 激光技术; 分岔; 混沌; 调制; 自发辐射因子

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Influence of Spontaneous Emission Factor on the Bifurcation and Chaos Behavior of VCSEL under Large Signal Modulation

DENG Guo^{1,2}, PAN Wei^{1,2}, LUO Bin¹

¹ Department of Computer of Communication Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

² National Key Laboratory of Broad-Band Optical Fiber Transmission and

Communication Network Technology, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract The model of the vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) was established by SIMULINK and the influence of the spontaneous emission factor on the high frequency and large signal modulation response is studied. The result shows when its value varied from 5×10^{-3} to 5×10^{-5} , with the modulation index deepening, the peak photon density will exhibit bifurcation and multi-period, then go back to single period. But if it reduces to 10^{-5} , the peak photon density will exhibit chaos at last. Furthermore, the position of the bifurcation occurs is depend on the value of spontaneous emission factor. A large spontaneous emission factor can suppress the nonlinear behaviors of VCSEL. The simulation results are agree with the experimental results reported in document.

Key words laser technique; bifurcation; chaos; modulation; spontaneous emission factor

1 引 言

相对于边发射激光器, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有诸多优点, 因而近期在光放大器、混

沌保密通信、高速数字通信等方面得到了广泛的应用^[1~3], 它的调制特性也随之得到关注。文献表明, 在大信号调制下, 如同边发射器件, VCSEL 会呈现一系列非线性特性, 如倍周期、四周期以致混沌状

收稿日期: 2002-10-23; 收到修改稿日期: 2002-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10174057)、宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室开放课题资助项目。

作者简介: 邓 果(1979—), 男, 西南交通大学计算机与通信工程学院博士研究生, 主要从事半导体激光器与光通信研究。

E-mail: dvt@swjtu.cn

万方数据

态^[4~6]。有意义的是,这些非线性特性能够被大自发辐射因子所抑制^[7,8]。因此,有必要针对大信号调制下 VCSEL 稳定性、非线性动态特性进行较为深入的研究。目前,对 VCSEL 动态特性的研究集中在小信号调制^[9,10],对大信号一般采用作近似处理后数值求解的传统方法,而大信号调制下的 VCSEL 非线性动力学行为的动态仿真研究尚不多见。

本文从速率方程出发,利用 SIMULINK 构建了 VCSEL 的可视化模型。鉴于自发辐射因子在微腔激光器中的独特性,我们选择它为控制参量,研究了在大信号调制下,自发辐射因子对 VCSEL 稳定性及分岔点变化规律的影响,找到了非线性分岔点的变化规律,从理论上确定 VCSEL 稳定性运行条件,并对出现混沌的条件进行了探讨。

2 理论模型

仿真基于速率方程,在忽略了相位和噪声项后,考虑到量子阱结构中的增益饱和特性,则 VCSEL 的单模速率方程可用下面偏微分方程表示为^[11,12]

$$\frac{\partial P(t)}{\partial t} = v_g \left\{ \Gamma_Z a_N \frac{\ln[N(t)/N(0)]}{1 + \epsilon P(t)} - \alpha \right\} P(t) + \beta B_{sp} N(t)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N(t)}{\partial t} = \frac{I(t)}{qV} - v_g \Gamma_Z a_N \frac{\ln[N(t)/N(0)]}{1 + \epsilon P(t)} P(t) - \frac{N(t)}{\tau_c} \quad (2)$$

式中, $P(t)$ 为光子密度, $N(t)$ 为载流子密度,其他参量见表 1。自发辐射因子可近似表示为^[6]: $\beta = \frac{3}{2}$

$\frac{\Gamma_Z K \lambda_0^4}{4\pi^2 n_{eff}^3 V \Delta \lambda}$, 其中, K 为增长因子, n_{eff} 为等效折射率, λ_0 为所发射激光波长。对于微腔激光器,由于有源层体积 V 急剧减小,仅有几个光学模式处于有源介质增益谱中,腔内光模式间隔加大,并具有较小的光谱发射线宽 $\Delta \lambda$, 因而具有高自发辐射因子^[13]。

为了方便分析,采用振幅为 I_m , 调制频率为 f_m 的正弦波调制。注入电流 $I(t) = I_d + I_m \sin(2\pi f_m t)$, 其中 I_d 为直流偏置电流。对其他波形也做了仿真。

与速率方程对应的 SIMULINK 模型示意图见图 1。它由控制模块、主模块、显示和分析模块三部分构成,分别用于输入参量的控制、速率方程的直接求解、仿真结果的实时显示和数据收集。此模型的主要特点是采用可视化模块动态仿真,避免了对大

信号调制作近似分析的条件限制。可直接对不同参量进行仿真,或根据需要更改器件参量,研究器件的不同特性。

表 1 仿真所用 VCSEL 参量含义及数值^[11]

Table 1 Values and descriptions of parameters of VCSEL used in simulation^[11]

Symbol	Description	Value
λ	Lasing wavelength	980 nm
a_N	Gain coefficient	$1.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$
α	Equivalent cavity loss	50.3 cm^{-1}
$N(0)$	Carrier transparency density	$1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
d	Thickness of active region	$0.1 \times 10^{-4} \text{ cm}$
v_g	Group velocity	$8.3 \times 10^9 \text{ cm/s}$
Γ_Z	Longitudinal optical confinement factor	0.065
ϵ	Gain suppression factor	$1 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$
τ_c	Carrier lifetime in active layer	3 ns
B_{sp}	Bimolecular recombination coefficient	$1 \times 10^{-10} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$

3 仿真结果与分析

仿真参量如表 1,同时取 VCSEL 孔径 $\omega = 5 \mu\text{m}$, 调制频率 $f_m = 5 \text{ GHz}$, $I_d = 1.8 I_{th}$ (I_{th} 为阈值电流)。

此外,光子密度作了归一化处理 ($P_{npeak} = P_{peak}/P_n$, 其中 P_{peak} 为峰值光子密度, $P_n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 为归一化参量)。改变自发辐射因子的值,仿真得到一系列分岔图和时序图,限于篇幅,只给出部分结果,见图 2~4。

图 2(a)是设定 $\beta = 10^{-4}$ 时仿真得出的分岔图(横轴为调制深度,纵轴为峰值光子密度)。图 2(b)是当 $m = 2$ 时的时序图。可以看出,随着调制深度的加深,峰值光子密度由单周期 ($0 < m < 1.6$) 到倍周期 ($1.6 < m < 6.4$) 再回到单周期 ($m > 6.4$) 的演变过程。需要指出的是,在 $m = 1.6$ 时,峰值光子密度第一次出现分岔,呈现非线性效应。在 $1.6 < m < 6.4$ 的范围内,出现光学双稳态,此时光子密度有两个稳态,相应地,在时序图 2(b)中出现两个峰值。

分岔点变化情况如图 3 所示。图 3(a)是 β 从 10^{-2} 减小到 10^{-4} 时的分岔情况,图 3(b)是 $\beta = 5 \times 10^{-5}$ 和 10^{-5} 时的分岔图。可以看出,当 β 减小到 5×10^{-3} 时,峰值光子密度开始出现分岔,第一分岔点出现在 $m \approx 2.0$ 处,随着 β 值的减小,它的位置向左移动,在更浅的调制深度下就会出现分岔。当 β 为

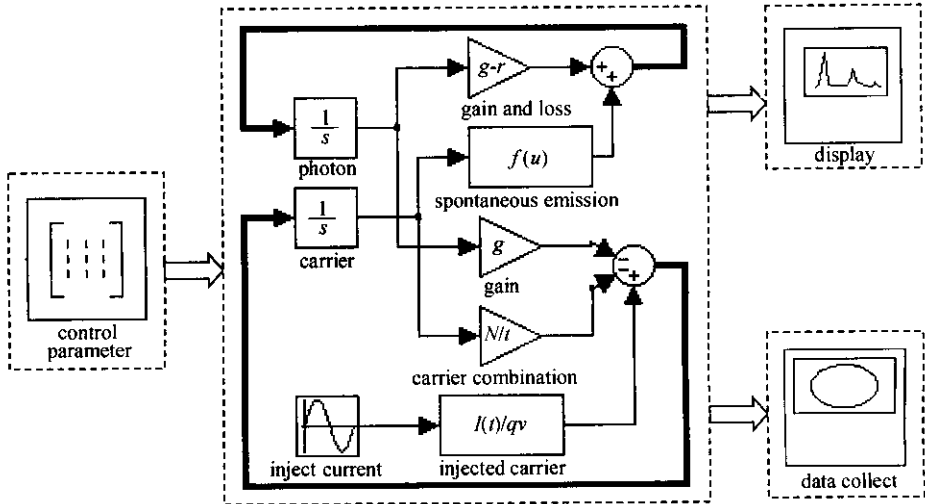


图 1 SIMULINK 模型简图

Fig. 1 Schematic diagram of the SIMULINK model

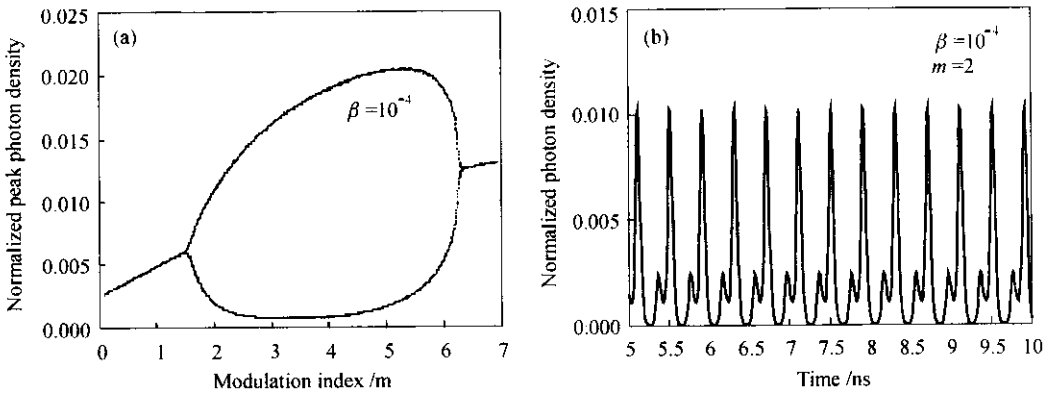


图 2 (a) 光子密度分岔图; (b) 光子密度随时间变化呈现双稳态

Fig. 2 (a) Bifurcation diagram of photon density versus modulation index;

(b) Double-period of photon density in time-domain

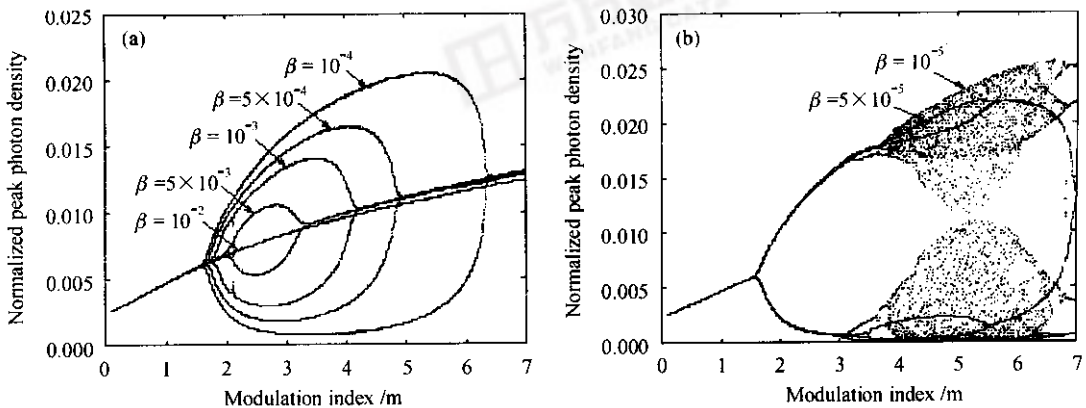


图 3 以 β 为参量仿真得到 VCSEL 分岔图

Fig. 3 Bifurcation diagram of a VCSEL with various β

10^{-3} 时分岔出现在 $m \approx 1.73$ 处, 为 5×10^{-4} 时在 $m \approx 1.62$ 处, 为 10^{-4} 时在 $m \approx 1.55$ 处。同时, 分岔合

并的位置向右移动, 封闭环包围的面积更大, 环的线度更宽。但是当 $\beta < 10^{-4}$ 后, 第一分岔点对 β 的敏感

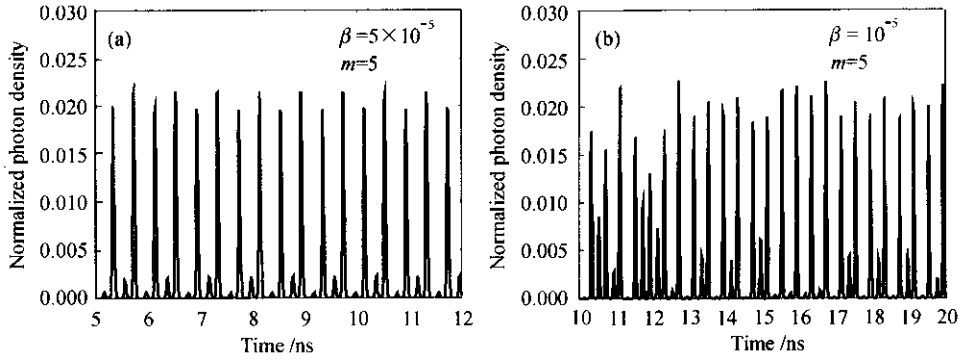


图 4 光子密度随时间变化呈现四周期(a)和混沌状态(b)

Fig. 4 (a) Period quadrupling of photon density in time-domain;

(b) Chaos of photon density in time-domain

程度逐渐降低,若继续减小 β ,第一分岔点的左移很微小,却使第二分岔点产生左移(图 3(b))。当 $\beta \leq 5 \times 10^{-5}$ 后出现四分岔, $\beta = 10^{-5}$ 时,峰值光子密度经由二分岔、四分岔后进入混沌状态,对应的时序图见图 4。

图 4 是 $\beta = 5 \times 10^{-5}, 10^{-5}$ 时的时序图。从图 4(a)中可以明显看出光子密度有四个峰值,即四周期。继续减小 β ,如图 4(b)中光子密度已经没有规律,呈现出混沌状态。

结果表明, β 是控制 VCSEL 稳定性的一个重要因素,大的 β 值能抑制混沌的出现,提高 VCSEL 的稳定性,增加可用调制度,使其工作在线性范围内($\beta = 10^{-1}, 10^{-2}$ 时光子密度始终呈线性增长)。

4 结 论

本文中,VCSEL 器件的模拟以可视化方式实现,开发出相应的系统模块,对使用 SIMULINK 进行光学器件和系统仿真作了有益的探索。实践证明,这种方法是行之有效的,尤其是在处理大信号时,由于避免了做近似分析,结果使精确程度得到提高。该模型既可用于系统模拟,也可以有助于探讨器件参量,优化器件。

运用此模型,发现随着调制深度的加深,峰值光子密度会产生倍周期或四周期,直至进入混沌状态或重新回到单周期。与此同时,第一分岔点会随着 β 减小而左移,分岔点出现的调制深度变浅,而且移动程度依赖于 β 值的大小。调控 β 值可以抑制系统的非线性行为,结果与文献[4,7]实验结果相符。

参 考 文 献

- 1 E. S. Björin, J. E. Bowers. Noise figure of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(1):61~66
- 2 J. Ohtsubo. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1141~1154
- 3 J. S. Gustavsson, A. Haglund, J. Bengtsson *et al.*. High-speed digital modulation characteristics of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers-numerical simulations consistent with experimental results [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(9):1089~1096
- 4 E. Hemery, L. Chusseau, J.-M. Lourtioz. Dynamic behaviors of semiconductor lasers under strong sinusoidal current modulation; Modeling and experiments at 1.3 μm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(4):633~641
- 5 R. J. Jones, P. S. Spencer, K. A. Shore. Controlling chaos in a semiconductor laser by external optical injection [J]. *IEE Proc. Optoelectron.*, 2000, **147**(2):67~70
- 6 J. H. Shin, Y. G. Ju, H. E. Shin *et al.*. Spontaneous emission factor of oxidized vertical-cavity surface emitting lasers from the measured below-threshold cavity loss [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(18):2344~2346
- 7 G. Carpintero, H. Lamela. Influence of noise in the route to chaos of directly modulated semiconductor lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(6):2766~2772
- 8 Y. Hori, H. Serizawa, H. Sato. Chaos in a directly modulated semiconductor laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(5):1128~1133
- 9 K. A. Black, E. S. Björin, J. Piprek *et al.*. Small-signal frequency response of long-wavelength vertical-cavity lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(10):1049~1051
- 10 Y. Satuby, M. Orenstein. Mode-coupling effects on the small-signal modulation of multitransverse-mode vertical-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(6):944~954
- 11 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
- 12 P. V. Mena, S.-M. Kang, T. A. DeTemple. Rate-equation-based laser models with a single solution regime [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(4):717~730
- 13 Y. Yamamoto, R. E. Slusher. Optical processes in microcavities [J]. *Phys. Today*, 1993, (6):66~73