

文章编号: 1001-3806(2005)01-0074-03

## VC SOA 中光双稳环宽控制的理论分析

邓 果, 潘 炜\*, 罗 斌, 严云富, 李孝峰, 赵 峥

(西南交通大学 计算机与通信工程学院, 成都 610031)

摘要: 基于法布里-珀罗 (F-P) 腔光束干涉理论, 建立垂直腔半导体光放大器 (VC SOA) 的双稳模型。针对近期实验参数, 仿真研究了透射模式下 VC SOA 的双稳特性, 找到实现双稳环宽控制的 3 种基本途径, 即适当增大偏置电流、保持偏置与阈值比不变情况下提高顶端面反射率、减小初始相位失谐量都会使双稳环宽变宽。

关键词: 垂直腔半导体光放大器; 双稳态; 双稳环宽; 光开关

中图分类号: TN 722 文献标识码: A

### Theoretical analysis of the loop width control of bistability in VC SOA

DENG Guo, PAN Wei, LUO Bin, YAN Yun-fu, LI Xiaofeng, ZHAO Zheng

(Department of Computer and Communication Engineering Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** Based on the beam interferential theory of Fabry-Perot semiconductor laser, a bistable model of vertical cavity semiconductor optical amplifier (VC SOA) was established. According to recently experimental parameters, the bistable characteristics of VC SOA are investigated by simulation and three methods of controlling the width of hysteresis loop have been achieved: to enhance the bias current properly, increase top mirror reflectivity of VC SOA without changing the ratio of bias current versus threshold current or decrease initial phase detuning. All the methods can increase the loop width of the hysteresis loop.

**Key words** VC SOA; optical bistability; hysteresis loop width; optical switch

## 引 言

光学双稳态由于在光信息处理、光通信、光计算等领域可用作光开关和光逻辑器件, 因而近年来倍受关注<sup>[1-4]</sup>。在双稳现象中, 双稳环宽是一个重要的指标, 标志着器件的开关灵敏度和稳定性。垂直腔半导体光放大器 (VC SOA) 继承了垂直腔面发射光激光器 (VCSEL) 的优点, 以其独特的结构和良好的特性, 如对偏振不敏感, 易于调整端面反射率, 便于阵列集成, 与光纤耦合效率高等优点, 在光互联、并行光数据处理等领域得到广泛应用, 是当前半导体光电器件中引人注目的前沿课题<sup>[5,6]</sup>。近期实验已经证实, VC SOA 和传统半导体光放大器相比, 在更为严格的条件下也会出现双稳现象, 且获得光学双稳时输入光功率低至微瓦量级<sup>[2,7]</sup>。这一突出优点使 VC SOA 成为密集波分复用 (DWDM) 系统中光开关的很好选择, 具有潜在的应用价值。因此, 对于这种新型器件的光学双稳环宽的研究具有一定的意义。针对 VC SOA 的特殊结构,

建立 VC SOA 的双稳模型, 数值计算研究了 VC SOA 在透射模式下的双稳特性, 对光学双稳态的环宽与其可调参数 (偏置电流、初始相位失谐量、端面反射率) 之间的关系进行了探讨, 从理论上提出了控制双稳环宽的途径。

## 1 理论模型

典型 VC SOA 顶端、底端是高反射率 GaAs/AlAs 材料的分布布拉格反射镜 (DBR), 反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$ 。多量子阱 (MQW) 构成的有源层夹在 DBR 中间, 和两端高反射率 DBR 一起构成一个 F-P 谐振腔。实际应用中输入/输出光由光环形器导入和导出, 抽运可采用电或光抽运形式。信号光由顶端垂直入射, 经 DBR 构成的谐振腔放大后由顶端或底端输出, 分别对应反射和透射两种工作模式。

由于自发辐射和输入光强相比很小, 忽略掉自发辐射后, 由 F-P 干涉仪的标准理论可以得到反射模式下 VC SOA 的稳态输入输出关系, 表示为<sup>[3,8]</sup>:

$$\frac{I_{\text{ref}}}{I_{\text{in}}} = \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2} e^{gL}) + 4\sqrt{R_1 R_2} e^{gL} \sin^2 \varphi}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{gL})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} e^{gL} \sin^2 \varphi} \quad (1)$$

式中,  $I_{\text{in}}$  是注入光强,  $L$  是有源区厚度,  $g$  是净增益,  $\varphi$  是单程相位改变量, 表示经放大器放大后, 信号光的波长失谐量。它们分别表示为<sup>[7]</sup>:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10174057); 四川省应用基础研究基金资助项目 (03JY 029-048-1)

作者简介: 邓 果 (1979-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤通信与光器件的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: weipan80@sohu.com

收稿日期: 2003-12-15; 收到修改稿日期: 2004-02-23

$$g = \Gamma g_0 + 2\Gamma (\varphi_0 - \varphi) / b - \alpha \quad (2)$$

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{g_0 L b}{2} \left[ \frac{I_{av}}{I_s + I_{av}} \right] \quad (3)$$

式中,  $\Gamma$  是模场限制因子, 对垂直腔型器件, 一般取值为 1。  $g_0$  是未饱和增益, 可线性近似为:  $g_0 = a(n_1 - n_0)$ 。  $a$  是微分增益系数,  $n_1$  是未注入光时的载流子浓度,  $n_0$  是透明载流子浓度。  $\alpha$  是有效腔损耗, 包括端面损耗和吸收损耗。  $\varphi_0$  是初始相位失谐量, 反映信号光偏移中心波长的程度。  $b$  为线宽展宽因子。  $I_s$  和  $I_{av}$  分别是饱和光强和平均光强。 其中:

$$\frac{I_{av}}{I_{in}} = \frac{(1 - R_1)(1 + R_2 e^{gL})(e^{gL} - 1)}{[1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{gL}]^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2} e^{gL} \sin^2 \varphi] g L} \quad (4)$$

可以看出,  $I_{av}$  是依赖于  $I_{in}$  的中间变量, 对于确定的  $I_{in}$ , 由 (2) 式 ~ (5) 式可数值求解  $I_{av}$ , 进而求出别的变量。

## 2 模拟结果与讨论

已有研究者指出, VC SOA 在偏置接近阈值和初始相位失谐量为负的情况下可能出现光学双稳<sup>[7]</sup>。 在此基础上, 对 (1) 式 ~ (4) 式数值求解, 研究了偏置电流、端面反射率、初始相位失谐量与双稳环宽的关系。 对 VC SOA 的其它双稳特性, 有另文描述, 此外, 对透射模式下的双稳性质, 也做了仿真, 限于篇幅, 不再给出。 除特别说明外, 所采用典型结构参数如下:  $\alpha L = 0.0002$ ,  $b = 4.8$ ,  $\Gamma = 1$ ,  $R_1 = 0.9900$ ,  $R_2 = 0.9970$ 。

### 2.1 偏置电流对双稳环宽的影响

图 1a 是在不同偏置下绘出的双稳曲线。 从图 1a

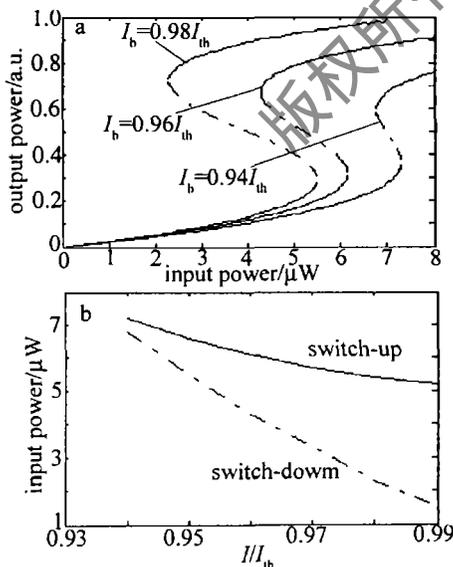


Fig 1 a- $P_{in}$ - $P_{out}$  curve b-switching power as a function of bias

可以看出, 在固定初始相位失谐量为  $-3 \times 10^{-4}$  情况下, 对于不同的偏置电流 ( $I_b = 0.94I_{th}$ ,  $0.96I_{th}$ ,  $0.98I_{th}$ ), 随着注入光功率的增大, VC SOA 呈现不同的

双稳特性。 即偏置电流越接近阈值, 双稳态的开启和关闭功率减小, 双稳区域左移, 环宽变宽。 图 1b 中给出了对应的双稳开关功率与偏置电流的关系曲线, 上下两条曲线对应点之间的距离即为双稳环宽, 从中也可以看出, 双稳开启和关闭功率与偏置电流成反比, 近似线性变化, 随着偏置电流的增大, 双稳关闭功率下降速度远大于开启功率下降速度, 因而使环宽变宽。  $I_b = 0.98I_{th}$  时, 环宽达到  $2.1 \mu\text{W}$ 。 究其原因, 是因为偏置电流增大导致腔内载流子浓度变高, 进而使腔内光场强度增加, 使得双稳开启阈值降低, 而当输入光功率下降时, 腔内的光场仍能维持在高的数值, 由于腔内非线性介质的非线性折射率的存在, 腔内传播的相位  $\varphi$  也维持在共振值附近, 使输出光功率保持在较高水平, 仅当输入光功率下降至很低的数值时, 这时非线性折射率已不足以维持高输出光功率所对应的  $\varphi$ , 导致输出光功率突然下跌, 双稳环宽变宽。

### 2.2 上端面反射率对双稳环宽的影响

VC SOA 由于谐振腔垂直于生长平面, 有源区厚度决定了增益区长度。 增益路径 ( $10\text{mm} \sim 30\text{mm}$ ) 比边发射器件小了 4 个量级, 因而需要有高反射率的反射镜。 改变端面反射率会引起谐振条件的变化, 改变阈值条件<sup>[9]</sup>, 进而影响 VC SOA 的双稳特性。 图 2 中是固定偏置电流为  $0.98I_{th}$ ,  $0.99I_{th}$  时双稳环宽和顶端面反射率的关系。 可以看出, 双稳环宽对反射率的改变非常敏感, 随着上端面反射率  $R_1$  的增大, 双稳环宽也随之变宽。 但是,  $R_1$  增大会引起 VC SOA 阈值电流显著降低, 需要更大的输入光功率才能产生双稳态。

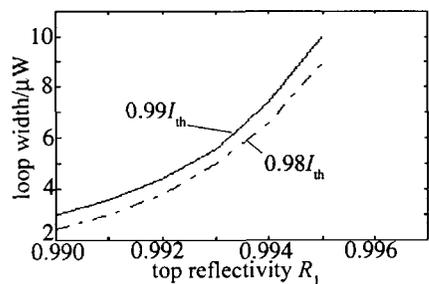


Fig 2 The dependence of the width of bistable loop on parameter  $R_1$

### 2.3 初始相位失谐量对双稳环宽的影响

在双稳态中另一个起重要作用的因素是初始相位失谐量。 由于 VC SOA 的高端面反射率限制了增益带宽<sup>[10]</sup>, 因此, 出现双稳态所需初始相位失谐量  $\varphi_0$  相对于传统半导体光放大器更小, 即波长偏移量更小, 导致 VC SOA 对输入波长非常敏感。 图 3 是不同偏置下的双稳环宽与  $\varphi_0$  的关系曲线, 可见, 双稳环宽与  $\varphi_0$  成反比关系,  $\varphi_0$  越小, 即输入光偏离 VC SOA 中心波长越多, 环宽越宽, 从 3 条曲线比较来看, 偏置电流增大, 环宽变宽, 这与前面的讨论是一致的。

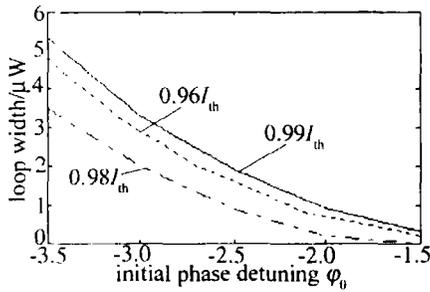


Fig 3 The dependence of the width of bistable loop on parameter  $\varphi_0$

### 3 结论

模拟计算结果较好地拟合了近期文献实验结果<sup>[2,7]</sup>,由以上分析可以看出,控制 VC SOA 的双稳环宽的 3 个基本途径为:(1)调控偏置电流,偏置电流越接近阈值,越容易获取双稳态,双稳环宽越宽;(2)改变上端面反射率,在偏置与阈值比值不变情况下,顶端面反射率越高,双稳环宽越宽;(3)调整初始相位偏移量。双稳环宽与初始相位失谐量成反比,失谐量越小,即信号光偏离中心波长越大,环宽越宽。该结论可为优化 VC SOA 的设计、制作、控制双稳特性提供理论依据。

### 参考文献

- [1] PAKDEEVAN CH P, ADAMSM J M. Measurements and modeling of reflective bistability in 1.55  $\mu\text{m}$  laser diode amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1999, 35(12): 1894~1903
- [2] WEN P, SANCHEZ M, GROSS M *et al*. Vertical-cavity optical AND gate [J]. Opt Commun, 2003, 219(2): 383~387
- [3] ADAMSM J, WESTLAKE H, J O' MAHONY M J *et al*. A comparison of active and passive optical bistability in semiconductors [J]. IEEE J Q E, 1985, 21(9): 1498~1502
- [4] 陈建国, 李焱, 陆洋 *et al* 用阈值表达式研究长外腔半导体激光器的双稳特征 [J]. 光学学报, 2000, 20(8): 1015~1020
- [5] ROYO P, KODA R, COLDRÉN L A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: comparison of Fabry-Perot and rate equation approaches [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(3): 279~284
- [6] TOMBLING G, SAIFOH T, MUKAIT. Performance predictions for vertical cavity semiconductor laser amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1994, 30(11): 2491~2498
- [7] SÁNCHEZ M, WEN P, GROSS M *et al*. Nonlinear gain in vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(1): 1~3
- [8] AGRAWAL G P, DUTTA N K. Semiconductor lasers [M]. 2nd ed. New York: van Nostrand Reinhold Press, 1993. 495~499
- [9] 张晓霞, 潘焱, 刘永智 *et al* 降低 VCSEL 激光阈值途径的理论研究 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(12): 1211~1214
- [10] 潘焱, 张晓霞, 罗斌 *et al* 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
- [11] SHABRYANOV R F, JASWAL S S. Magneto-optical properties of MnBi and MnBAl [J]. Phys Rev, 1996, B53(1): 313~317
- [12] GASCHE T, BROOKS M S S, JOHANSSON B. Calculated magneto-optical Kerr effect in Fe, Co and Ni [J]. Phys Rev, 1996, B53(1): 298~301
- [13] WANG C S, CALLAWAY J. Band structure of nickel spin-orbit coupling the Fermi surface, and the optical conductivity [J]. Phys Rev, 1974, B9(11): 4897~4907
- [14] LAMB N P, VIGNERON J P. Computation of crystal Green's functions in the complex-energy plane with the use of the analytical tetrahedron method [J]. Phys Rev, 1984, B29(6): 3430~3437
- [15] GUYOT-SINONNEST P, CHEN W, SHEN Y R. General considerations on optical second-harmonic generation from surfaces and interfaces [J]. Phys Rev, 1986, B33(12): 8254~8263
- [16] SPE J E, MOSS D J, van DER ELH M. Phenomenological theory of optical second- and third-harmonic generation from cubic centrosymmetric crystals [J]. Phys Rev, 1987, B35(3): 1129~1141
- [17] 王嘉赋, 李佐宜. 磁光 Kerr 效应的量子散射方法 [J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(8): 19~22
- [18] PAN R P, WEIH D, SHEN Y R *et al*. Optical second-harmonic generation from magnetized surfaces [J]. Phys Rev, 1989, B39(2): 1229~1234
- [19] 王蔚. 材料物理性能 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001. 165

(上接第 49 页)