

文章编号: 1001-3806(2011)02-0260-04

## 垂直腔半导体光放大器调谐输出特性分析

卢 静, 罗 斌, 周 刚, 赵淑平

(重庆电子工程职业学院 电子信息系, 重庆 401331)

**摘要:** 为了分析垂直腔半导体光放大器的调谐输出特性, 考虑到有源腔有效折射率和载流子浓度之间的关系, 并结合载流子速率方程, 采用建立腔内平均光子数与输入信号光功率之间的关系的研究方法, 对垂直腔半导体光放大器的调谐输出特性进行了理论分析和数值仿真。结果表明, 在一定的输入光功率和波长条件下, 可以观察到双稳现象; 双稳环的宽度随着输入光功率的变化先增大而后减小; 在一定的输入光功率下, 双稳环宽度随着抽运光功率的增大而增大; 对于波长大于中心波长的信号, 其增益在某些区域被放大。

**关键词:** 光通信; 垂直腔半导体光放大器; 速率方程; 双稳环宽

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.032

### Analysis of tune output property of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers

LU Jing, LUO Bin, ZHOU Gang, ZHAO Shu-ping

(Department of Electronic Information Engineering, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Considering the relationship between the average photon and the input signal power, the output tune characteristics were analyzed and simulated based on the carrier density rate equation. The relationship between the cavity reflective index and carrier density was also taken into account. The bistable phenomena was obtained at certain input optical power and wavelength. The bistability loop width first increases and then decreases with input optical power. The bistability loop width increases versus pump optical power. The gain is magnified at certain area when the wavelength is bigger than center wavelength.

**Key words:** optical communications; vertical-cavity semiconductor optical amplifier; rate equation; bistable loop width

### 引 言

由于光学双稳态在光逻辑运算和信号处理等方面的潜在应用前景, 在 20 世纪 80 年代和 20 世纪 90 年代之间对光学双稳态的研究引起了极大地关注。然而前期所做的工作主要是针对平面半导体光放大器, 但它的转换功率较高且不易于 2 维集成。研究表明, 垂直腔半导体光放大器 (vertical-cavity semiconductor optical amplifier, VCSEA) 相比, 传统边发射半导体放大器具有低转换功率、转换时间快、易于 2 维集成等优点, 使其在光逻辑运算和记忆器件等方面有广泛地应用<sup>[1-4]</sup>。

由于有源腔内载流子的密度和有效折射率相互关联, 当信号光波长改变时, 腔内载流子密度随之而变, 导致介质折射率发生变化, 从而使模式频率发生移动,

最终在调谐输出曲线上形成双稳环。

作者从腔内平均光子数与输入信号光功率的关系出发, 考虑了腔内载流子密度和有效折射率之间的变化关系, 得到了 VCSEA 在不同输入光功率下的调谐输出曲线, 给出了输入信号光功率与双稳环宽度之间的关系, 分析了抽运光功率对双稳环宽度的影响, 还得到了饱和特性曲线与信号光波长的关系。

### 1 结构模型

典型的 VCSEA 结构<sup>[4]</sup>如图 1 所示。有源层为多

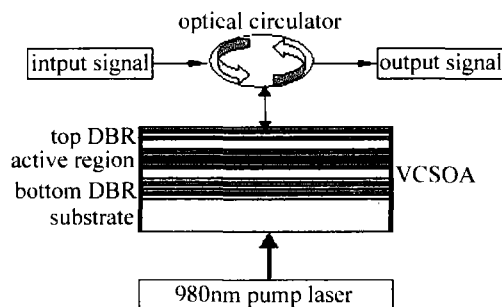


Fig. 1 Schematic diagram of the VCSEA device model structure

基金项目: 国家示范高职建设专项基金资助项目

作者简介: 卢 静 (1981-), 女, 硕士, 讲师, 从事光通信与光放大器方面的研究。

E-mail: lujing0808@163.com

收稿日期: 2010-04-19; 收到修改稿日期: 2010-04-21

量子阱构成, 两侧为具有高反射率、温度特性好的 GaAs/AlAs 材料分布布喇格反射器 (distribute Bragg reflector, DBR)。抽运光由底层注入, 透过 GaAs 衬底对 VC SOA 进行光抽运; 输入、输出光信号由光环形器分别导入和导出。输入光信号由顶层 DBR 垂直入射, 顶层 DBR 与底层 DBR 构成的谐振腔提供光反馈放大。VC SOA 工作模式分为透射模式 (光信号由底层 DBR 输出) 与反射模式 (光信号由顶层 DBR 输出)。

## 2 理论分析

垂直腔半导体光放大器有源腔中载流子浓度  $n$ , 抽运电流密度  $j$ , 材料增益  $g_m$  和输入光功率  $P_m$  的关系为<sup>[5]</sup>:

$$\frac{j}{el_q} = R + \frac{\Gamma c g_m}{N_g} [\beta S_{1a} + S_{2a}] \quad (1)$$

式中,  $e$  为电子电量,  $l_q$  为量子阱厚度,  $R = An + Bn^2 + Cn^3$ ,  $A$  为缺陷复合速率,  $B$  为自发光子辐射速率,  $C$  为俄歇复合速率, 纵向限制因子  $\Gamma = l_q/l_{ar}$ ,  $l_{ar}$  为有源区的有效腔长,  $c$  为光速,  $N_g$  为群折射率, 自发辐射因子  $\beta$  就是沿放大器轴向的自发辐射光子率,  $S_{1a}$  为由自发辐射引起的平均光子浓度,  $S_{2a}$  为由注入信号光引起的平均光子浓度。

目前, 由于使用光抽运有很多优点: (1) 载流子在量子阱中分布较均匀; (2) 器件结构不用掺杂, 简化了生产工艺, 降低了损耗, 所以大都直接采用光抽运, 但是抽运效率  $\varepsilon$  不高<sup>[6]</sup>。2000 年, 加利福尼亚大学的 BENTA BARBARA 课题小组研发的第 1 代 1.3  $\mu\text{m}$  光抽运 VC SOA,  $\varepsilon = 0.036$ 。第 2 代 VC SOA 中, 在有源区刻蚀边墙以限制载流子, 提高抽运效率<sup>[7]</sup>。拟合得到电流密度  $j$  为:

$$j = el_q \frac{T_p P_p}{A_p} \times \frac{\lambda_p}{hc} \times \frac{1 - \exp(-\alpha_q l_q)}{l_q} \times \varepsilon \quad (2)$$

透过率  $T_p \approx 1$ , 抽运光面积  $A_p = 50 \mu\text{m}^2$ ,  $P_p$  为抽运光功率,  $\lambda_p$  为抽运光波长, 目前一般采用波长为 980 nm 的光进行抽运,  $h$  为普朗克常量, 量子阱吸收系数  $\alpha_p = 5000 \text{cm}^{-1}$ 。

有源腔内由自发辐射引起的平均光子浓度  $S_{1a}$  为:

$$S_{1a} = \frac{\{(g_s - 1)[(1 - R_b)(1 + R_f g_s) + (1 - R_f)(1 + R_b g_s)]\}}{gl_c (1 - R_f R_b e^{2gl_{ar}})} \times 2 \left\{ \frac{R_{sp} N_g}{gc} \right\} \quad (3)$$

有源腔内由注入信号光引起的平均光子浓度  $S_{2a}$  为:

$$S_{2a} = \left[ \frac{(1 - R_f)(1 + R_b g_s)(g_s - 1)}{(1 - \sqrt{R_f R_b g_s})^2 + 4\sqrt{R_f R_b g_s} \sin^2 \phi} \right] \frac{P_{in} N_g}{\lambda l_{ar} A_{in} gc} \quad (4)$$

式中, 单程增益  $g_s = e^{gl_{ar}}$ , 模式增益  $g = \xi \Gamma g_m - \alpha_a$ ,  $\xi$  是增益增强因子, 它反映了 F-P 腔驻波波峰与有源区量子阱的对准程度, 对得越准, 单程增益就越大 ( $\xi < 2$ ),  $\alpha_a$  为腔内平均吸收系数,  $R_f$  和  $R_b$  分别为顶层端面和底层端面的反射率,  $A_{in}$  为注入光横截面积,  $R_{sp}$  为自发辐射项, 单程失谐相位  $\phi = 2\pi N l_{ar} (\lambda^{-1} - \lambda_r^{-1})$ , 反映了信号光波长  $\lambda$  与腔谐振波长  $\lambda_r$  的偏移程度,  $N$  为有效折射率,  $P_{in}$  为输入光功率。

材料增益  $g_m$  和载流子浓度  $n$  的关系为<sup>[6]</sup>:

$$g_m = g_0 \ln \left( \frac{n + n_0}{n_1 + n_0} \right) \quad (5)$$

式中,  $n_1$  是透明载流子浓度, 即受激辐射速率等于受激吸收速率时的载流子浓度,  $g_0$  和  $n_0$  分别为增益拟合参量和载流子拟合参量。

透射模式下的增益  $G$  为<sup>[8]</sup>:

$$G = \frac{(1 - R_f)(1 - R_b)g_s}{(1 - \sqrt{R_f R_b g_s})^2 + 4\sqrt{R_f R_b g_s} \sin^2 \phi} \quad (6)$$

根据 F-P 腔理论, 腔谐振波长  $\lambda_r$  与有源区等效腔长  $l_{ar}$  的关系为  $\lambda_r = 2N l_{ar}/k$ ,  $k$  为整数。

有效折射率  $N$  与载流子浓度  $n$  的关系为<sup>[8]</sup>:

$$N = N_m - bn \quad (7)$$

式中,  $b = 1.2 \times 10^{-26} \text{m}^{-3}$ ,  $N_m$  是与载流子浓度无关的材料折射率。作者曾使用同样的方法分析过 VC SOA 的增益饱和特性, 分析结果和实验结果得到了很好的吻合<sup>[9]</sup>。

## 3 计算结果

计算中所用到的参量为:  $N_g = 3.2$ ,  $l_q = 0.13 \mu\text{m}$ ,  $l_{ar} = 2.2 \mu\text{m}$ ,  $A^{-1} = 15 \text{ns}$ ,  $B = 1 \times 10^{-16} \text{m}^3/\text{s}$ ,  $C = 2 \times 10^{-41} \text{m}^6/\text{s}$ ,  $\alpha_a = 1.5 \times 10^3 \text{m}^{-1}$ ,  $g_0 = 1.58 \times 10^5 \text{m}^{-1}$ ,  $n_1 = 1.1 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$ ,  $n_0 = -0.63 \times 10^{24} \text{m}^{-3}$ ,  $\xi = 1.75$ <sup>[6]</sup>。

图 2 中给出了当  $R_f = 0.969$ ,  $R_b = 0.985$ ,  $j =$

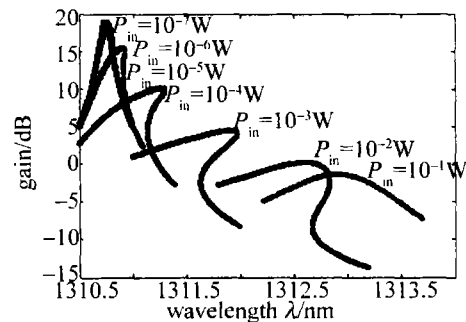


Fig. 2 Gain spectrum at various input power when  $R_f = 0.969$ ,  $R_b = 0.985$  and  $P_p = 261 \text{mW}$

$0.99j_{\text{max}}$  和  $P_p = 261 \text{mW}$  时不同输入光功率下的增益谱曲线,  $j_{\text{max}}$  为最大抽运电流密度。可以看出, 在较小的输入光功率下, 即  $P_{in} < 10^{-6} \text{W}$  时, 增益不饱和, 曲线基

本对称。随着输入光功率的增大,曲线呈现非对称性,并且谐振点波长向长波长方向移动,即红移。这是因为输入光功率增大,腔内载流子浓度降低,有效的折射率增大,所以谐振波长增大。适当地选择波长,在某些区域可以观察到双稳态<sup>[10]</sup>。当输入光功率变得更大( $P_{in} > 10^{-2}W$ )时,增益谱重新呈现对称性,并最终达到饱和。在其它抽运功率下,也呈现相同的变化趋势。不同的是,相同输入光功率下峰值波长要比  $P_p = 261mW$  时短。改变端面反射率时,其整体变化趋势仍和  $R_r = 0.969, R_b = 0.985$  相同,在特定的输入光功率下,曲线依然呈现非对称性,依然可看到双稳态。如果提高端面反射率,峰值波长的移动幅度减小。如果降低端面反射率,峰值波长的移动幅度增大。

图 3 中给出了当  $R_r = 0.969, R_b = 0.985, P_p =$

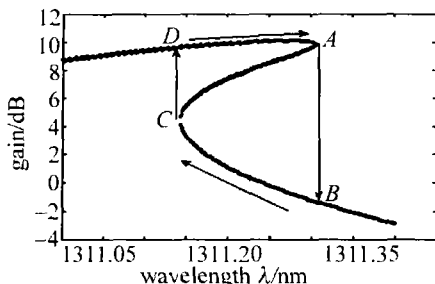


Fig. 3 Optical bistability curve at  $R_r = 0.969, R_b = 0.985, P_p = 261mW$  and  $P_{in} = 10^{-4}W$

261mW 和  $P_{in} = 10^{-4}W$  时的双稳态曲线,双稳环由 A, B, C 和 D 4 个点定出。增益在 A 点和 C 点处发生上下跳变,对应的波长分别为  $\lambda_A = 1311.32nm$  和  $\lambda_C = 1311.15nm$ ,环宽  $\Delta\lambda = \lambda_A - \lambda_C = 0.17nm$ ,对应的频宽为  $\Delta f = 30GHz$ 。当对 VCISOA 从短波长开始调谐,波长增大到位置 A,增益直接跳到位置 B。若从长波长开始调谐,波长减小到位置 C,增益直接跳到位置 D。图 4 中的两条双稳态曲线分别是在抽运功率  $P_p =$

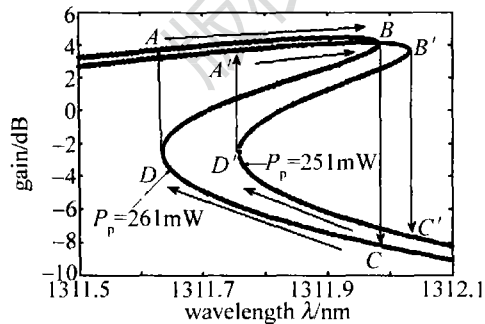


Fig. 4 Optical bistability curve at  $R_r = 0.969, R_b = 0.985$  and  $P_{in} = 10^{-3}W$  261mW 和  $P_p = 251mW$  下画出来的。与图 3 进行对比可以看出,输入光功率由  $P_{in} = 10^{-4}W$  增大到  $P_{in} = 10^{-3}W$  时,环宽增大,环宽  $\Delta\lambda = 0.35nm$ ,对应频宽  $\Delta f = 61GHz$ 。

但环宽并不是一直随着输入光功率的增大而增大

的。从图 2 知道,环宽随着输入光功率的增大先增大而后变小,最后完全观察不到双稳态。这说明存在一环宽极值点。图 5 中就给出了根据数值计算得到环宽

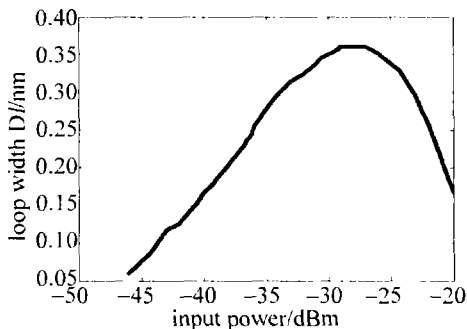


Fig. 5 Loop width versus input power at  $R_r = 0.969, R_b = 0.985$  and  $P_p = 261mW$

和输入光功率间的关系,可以看出,当  $P_{in} = -28dBm$  时,环宽达到最大值  $\Delta\lambda_{max} = 0.36nm$ 。同时对比一下图 4 中的两条曲线可以看出,相同的输入光功率下,如果降低抽运功率,上跳点和下跳点会右移,即在更大的波段跳变,且环宽变窄。图 6 中就给出了双稳环宽度

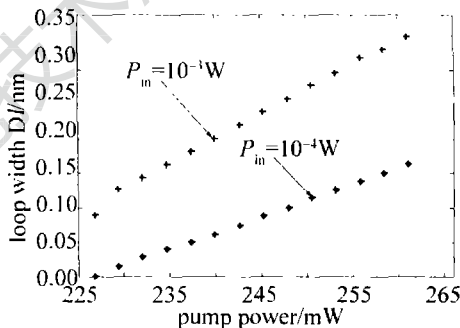


Fig. 6 Loop width versus optical pump power at  $R_r = 0.969$  and  $R_b = 0.985$  和抽运光功率的关系。可以看出,在一定的输入光功率下,环宽随着抽运功率的增大而逐渐增大。当抽运功率减小到一定程度时,双稳现象消失。如当输入光功率  $P_{in} = 10^{-4}W$ 、抽运功率  $P_p < 226.8mW$  时,双稳现象消失。

随着输入光功率的增大,增益达到饱和。但是随着载流子浓度的变化,增益谱发生了频谱搬移。这对饱和和特性曲线有影响。图 7 中给出了  $R_r = 0.969,$

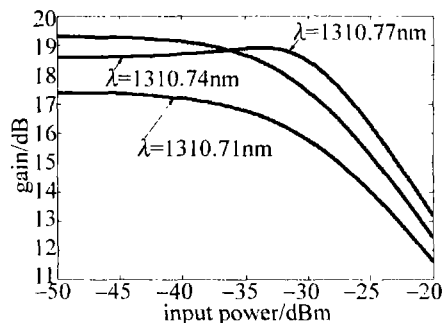


Fig. 7 Gain saturation curves at three wavelengths

$R_b = 0.985, j = 0.99j_{max}$  和  $P_p = 261mW$  时,3 个信号光波长下的增益饱和曲线。中心波长  $\lambda = 1310.74nm$ ,不

饱和增益为 19.2dB。可以看出,短波长和长波长信号呈现出明显不同的变化趋势。上面已经提到,随着输入光功率的变大,增益峰值波长向长波长方向移动。对于长波长信号,如  $\lambda = 1310.77\text{nm}$ ,在不饱和状态下,波长远离峰值增益波长。所以,不饱和增益小于中心波长增益,约为 18.5dB。随着输入光功率的增大,增益峰值波长变大,波长向增益峰值波长靠近,增益在某区域出现增强放大,如图中输入光功率在  $-35\text{dBm}$  和  $-30\text{dBm}$  之间时所示。而对于短波长信号,始终远离峰值增益波长,所以增益小于中心波长的增益。尽管这对目前增益线宽较窄的 VC SOA 意义不大。但是当 VC SOA 增益线宽提高后,当要求一定的放大时,选取的信号波长应比不饱和波长稍大些。另一方面,如果需要做光限制器,从该分析结果看出,选择短波长信号较好些。

#### 4 结 论

增大 VC SOA 的输入光功率,调谐输出曲线的增益峰值波长向长波长方向移动,在某些区域增益谱呈现非对称性,适当地选择波长可以观察到双稳态。双稳环的宽度随着输入光功率先增大后减小,随着抽运光功率增大而增大。由于增益谱的频移,对增益饱和和特性曲线有很大的影响。当信号波长大于中心波长时,增益在某些区域放大。信号波长小于中心波长时,增益很快达到饱和。

#### 参 考 文 献

- [1] TOMBLING C, SAITOH T, MUKAI T. Performance prediction for vertical-cavity semiconductor laser amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(11): 2491-2499.
- [2] PIPREK J, BJÖRLIN E S, BOWERS J E. Optical gain-bandwidth product of vertical cavity laser amplifiers[J]. Electronics Letters, 2003, 37(5): 298-299.
- [3] ROYO P, KODA R, COLDREN L A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: comparison of fabry-perot and rate equation approaches[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 38(3): 279-284.
- [4] BJÖRLIN E S, RIOU B, ABRAHAM P, et al. Long wavelength vertical-cavity semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2007, 37(2): 274.
- [5] ADAMS M J, COLLINS J V, HENNING I D. Analysis of semiconductor laser optical amplifiers[J]. IEE Proceedings, 2000, 132(1): 58-63.
- [6] PIPREK J, BJÖRLIN E S, BOWERS J E. Design and analysis of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 37(1): 127-134.
- [7] BJÖRLIN E S, KIMURA T, BOWERS J E, et al. Carrier-confined vertical-cavity semiconductor optical amplifiers for higher gain and efficiency[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2003, 9(5): 1374-1385.
- [8] HENNING I D, ADAMS M J, COLLINS J V. Performance predictions from a new optical amplifier model[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 21(6): 609-613.
- [9] LU J, LUO B, PAN W, et al. Analysis of influencing factors on gain saturation property of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers[J]. Laser Technology, 2007, 31(5): 496-499 (in Chinese).
- [10] PAN W, ZHANG X X, LUO B. Theoretical study of bistable and logic characteristics in vertical cavity semiconductor optical amplifier[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2005, 26(2): 357-362 (in Chinese).

(上接第 233 页)

- [2] LIU W G. Study on the cylindrical continuous wave HF chemical high energy lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 62 (in Chinese).
- [3] FEDOROV I A. CW chemical HF/DF laser[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2010: 35 (in Chinese).
- [4] HUZEL D K. Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2004: 129-142 (in Chinese).
- [5] YAN B Zh. Study on base-ejecting continuous wave DF/HF chemical lasers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009: 96 (in Chinese).
- [6] DUNCAN W A, PATTERSON S P, GRAVES B R, et al. Overtone research advanced chemical laser module design[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2119: 47-58.
- [7] SALTER G R, BROWN C H, DRISCOLL R J, et al. Chemical laser advanced diffuser ejector[R]. Buffalo: Bell Aerospace Textron, 1978: 1-204.
- [8] TSIEN H S. Physical mechanics teaching materials[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007: 238-248 (in Chinese).
- [9] WANG F J. CFD analysis—principles and applications of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 126 (in Chinese).
- [10] ZHANG L, YE Zh Y, WANG G. Numerical simulation of COIL injection[J]. Laser Technology, 2007, 31(4): 344-347 (in Chinese).
- [11] BAIN D B, SMITH C E, HOLDEMAN J D. CFD mixing analysis of jets injected from straight and slanted slots into confined crossflow in rectangular ducts[C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Nashville: AIAA, 1992: 1-29.
- [12] TONG B G, YIN X Y, ZHU K Q. Theory of vortex movement[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 57-59 (in Chinese).