

垂直腔半导体光放大器双稳及逻辑特性的理论研究^{*}

潘 炜¹ 张晓霞² 罗 斌¹ 邓 果¹ 李孝峰¹ 陈建国³

(1 西南交通大学计算机与通信工程学院 光通信与光器件研究所, 成都 610031)

(2 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(3 四川大学光电系, 成都 610064)

摘要: 基于垂直腔半导体光放大器(VCSOA)双稳模型,从数值上分析了 VCSOA 的双稳条件、双稳控制以及双稳环简并下的 AND 逻辑实现.结果表明,在阈值附近(大于阈值的 93%)和初始相位失谐量为负的情况下,输出光功率出现双稳态.偏置电流为阈值的 98%时,输入光功率在 5.5 μ W 和 2.2 μ W 处发生上下跳变的结果与实验报道结果吻合得较好.同时,从理论上给出了偏置电流、相位失谐量、线宽展宽因子、顶端面反射率等控制参数对 VCSOA 开关功率、跳变点、双稳环宽和环宽简并以及对比度的影响规律.

关键词: 半导体光放大器; VCSOA; 双稳态; 开关功率; 双稳环简并

PACC: 4255P; 4265P; 4260D

中图分类号: TN383

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)02-0357-06

1 引言

微腔作为凝聚态物理中的典型代表,近年来发展极快.引人注目的半导体垂直型微腔器件,如垂直腔面发射半导体激光器(VCSELs)、谐振腔增强型探测器(RCE PD)、反射式自电光效应器件(SEED)、垂直腔半导体光放大器(VCSOA),以其独特的结构和良好的性能,在新一代光通信、光信息处理、光互连和光计算领域受到青睐^[1,2].VCSOA 是一种新型的半导体光放大器,作为 VCSELs 结构的延伸,与传统的边发射光放大器(EESOA)相比,除了结构的差异外,还具有偏振不敏感、噪声低以及与光纤耦合效率高的优点,特别是 VCSOA 易于实现二维阵列这一特点,使之具有很好的应用前景^[3~5].从已有文献来看,对半导体光放大器的研究多集中在早期的 EESOA,对 VCSOA 微腔的研究是近几年的事情.自 Tombling 最初预测 VCSOA 的可能性^[3],随后有多个研究小组分别报道 970,1300 和 1500nm 波段的

放大实验,目前增益指标已达到 17dB^[4~7].对于这种结构独特的竖直型微腔器件,人们的研究兴趣除了在它的结构、材料、增益带宽和噪声特性方面外^[4~6],利用 VCSOA 实现光调制、光开关和光探测等研究也引起了关注.

VCSOA 具有单程增益小、阈值低、端面反射率高、增益带宽窄等特点,表现出与 EESOA 十分不同的特性^[8~10],但有关 VCSOA 非线性特性的理论研究尚不多见.近期,有实验报道 VCSOA 存在双稳现象^[8].光学双稳态在未来光逻辑器件和全光通信中具有重要应用价值,如在波分复用系统(复用和解复用)中实现光开关和光互连,以及在光存储系统中所具有的潜在应用.本文考虑到 VCSOA 与 EESOA 的结构差异,通过建立 VCSOA 的双稳模型,从理论上研究了 VCSOA 的双稳特性、双稳控制以及双稳环简并下的 AND 逻辑特性.试图确立 VCSOA 双稳的产生条件;分析跳变点、环宽和对比度对于偏置电流、初始相位失谐量、线宽增长因子和端面反射率的依赖关系;给出实现降低双稳开关功率、控制环宽、

^{*}国家自然科学基金(批准号:10174057,90201011),四川省应用基础研究(批准号:03JY029-048-1)及高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20030613007)资助项目

潘 炜 男,1959 年出生,教授,博士生导师,从事量子理论及半导体微腔激光器的研究. Email: weipan80@sohu.com

张晓霞 女,1961 年出生,教授,现从事半导体物理及光电子器件研究.

2004-01-14 收到,2004-05-10 定稿

增加对比度和提高响应速度的有效途径.

2 理论模型

典型 VC SOA 顶端、底端是高反射率 GaAs/AlAs 材料的 DBR, 设等效反射率分别为 R_1 和 R_2 . 多量子阱 (MQW) 结构的有源层被夹在中间, 构成一个 Fabry-Perot 谐振腔, 其泵浦方式有电泵浦和光泵浦两种形式. 相比之下, 电泵浦下 MQW 结构载流子分布不均匀; 而光泵浦有着明显的优点, 载流子直接在量子阱中产生, 并趋于均匀分布, 简化了载流子输运问题. 另外, 光泵浦允许使用未掺杂材料, 因此光损耗很小. 光泵浦式 VC SOA 测试系统如图 1 所示^[7,8], 信号光由光环路器导入和导出, 经顶端垂直入射放大后输出. 这里, VC SOA 存在两种工作模式, 即反射模式和透射模式.

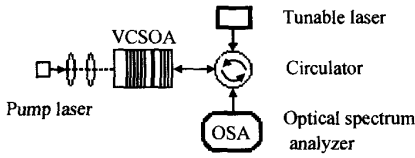


图 1 光泵浦式 VC SOA 测试系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic representation of the VC SOA

基于 VC SOA 的单模耦合速率方程和 F-P 腔干涉仪的标准理论, 忽略自发辐射 (由于自发辐射和输入光强相比很小), 可以得到反射和透射两种工作模式下 VC SOA 的稳态输入和输出关系, 分别表示为^[11]

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

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

其中 I_{in} 是输入光强; L 是腔长; g 是净增益; ϕ 是单程相位改变量, 它表征经放大器放大后信号光的波长失谐量. F-P 腔中, 沿 z 轴正反方向的光场 $F^\pm(z, E)$ 为

$$F^\pm(z, E) = A^\pm \exp[\pm \frac{gz}{2} \mp ikz] \quad (3)$$

式中 A^\pm 是光场的振幅; 传播常数 $k = \frac{2\pi N E}{hc}$, h 是普朗克常数, c 是光速, N 是有效折射率, E 是光子能量. 同时, VC SOA 满足下列边界条件

$$F^+(0, E_s) = t_1 F_{\text{in}} + r_1 F^-(0, E_s) \quad (4)$$

$$F^-(L, E_s) = r_2 F^+(L, E_s)$$

其中 F_{in} 为输入光场; E_s 对应谐振时的光子能量; t_i 和 r_i ($i=1, 2$) 分别为 VC SOA 顶端、底端 DBR 的等效透射和反射系数. 结合 (3) 和 (4) 式, 可以得到

$$A^+ = \frac{t_1 F_{\text{in}}}{1 - r_1 r_2 \exp(gL - 2ikL)} \quad (5)$$

$$A^- = r_2 A^+ \exp(gL - 2ikL)$$

这样, VC SOA 轴向平均光子密度

$$S_{\text{av}} = \frac{1}{L} \int_0^L [|F^+(z, E)|^2 + |F^-(z, E)|^2] dz \quad (6)$$

将 (3) ~ (5) 式代入上式, 并利用 $R_i = r_i^2 = 1 - t_i^2$;

$|F_{\text{in}}|^2 = \frac{P_{\text{in}} N_g}{E w c}$, P_{in} 为输入光功率, w 为有源层面积, N_g 为介质的群折射率, 上式可改写成

$$S_{\text{av}} = \frac{(1 - R_1)(1 + R_2 e^{gL})(e^{gL} - 1)}{[(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{gL})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} e^{gL} \sin^2 \phi] gL} \times \frac{P_{\text{in}} N_g}{E w c} \quad (7)$$

改用光强 (对应于单位面积的功率) 表示, 即 $I = |F(z, E)|^2 Ec / N_g = S Ec / N_g$, 则平均光强

$$I_{\text{av}} = \frac{(1 - R_1)(1 + R_2 e^{gL})(e^{gL} - 1)}{[(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{gL})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} e^{gL} \sin^2 \phi] gL} I_{\text{in}} \quad (8)$$

若采用线性近似, 未饱和增益可表示为 $g_0 = a(n_1 - n_0)$, a 是增益系数, n_1 是未输入光时的载流子密度, n_0 是透明载流子密度, VC SOA 的净增益 (gL) 表示为

$$gL = g_0 L + (\phi_0 - \phi) \frac{2}{b} - L \quad (9)$$

其中 γ 是径向限制因子; γ 是有效腔损耗, 包括端面损耗和吸收损耗; 初始相位失谐量 ϕ_0 反映了信号光相对于中心波长的偏移程度; 而线宽展宽因子 $b = -\frac{4}{a} \times \frac{dN}{dn}$, 其中 λ 是波长, $\frac{dN}{dn}$ 表示折射率随载流子密度 n 的变化率. VC SOA 的单程相位改变量为

$$\phi = \phi_0 + \frac{2L}{b} (n - n_1) \frac{dN}{dn} \quad (10)$$

注意到, 稳态载流子密度的速率方程^[9]

$$\frac{j}{ed} = R_{\text{sp}} + \frac{g_m I_{\text{av}}}{E} \quad (11)$$

其中 自发辐射速率 $R_{\text{sp}} = \frac{n}{\tau}$; $n_1 = \frac{j}{ed}$, e 是电子电

荷, 是载流子寿命, j 是电流密度, d 是有源层厚度. 由(11)式和未饱和增益 g_0 , 可以得到材料增益 $g_m = a(n - n_0)$ 满足如下关系

$$g_m = \frac{g_0 I_s}{I_s + I_{av}} \tag{12}$$

这里定义饱和光强 $I_s = \frac{E}{a}$. 代入(10)式后, 则单程相位改变量可改写为

$$\phi = \phi_0 + \frac{g_0 L b}{2} \times \frac{I_{av}}{I_s + I_{av}} \tag{13}$$

从方程(8), (9)和(13)不难看出, 平均光强 I_{av} 是中间变量, 又以隐函数的形式出现, 需采用数值方法求解. 求得 I_{av} 后, 同时利用 VC SOA 耦合速率方程^[5], 得到稳态解, 即可得到其他相关变量之间关系.

3 计算与分析

下面着重就偏置电流、初始相位失谐量、顶端面 DBR 反射率等参量对 VC SOA 输入和输出特性的影响进行模拟分析. 除特别说明外, 采用下列典型参数: $R_1 = 0.9900$, $R_2 = 0.9970$, $L = 0.0002$, $b = 4.8$ 和 $\gamma = 1$. 在处理方法上, 一般采用迭代法^[11], 但是该方法对初值敏感且运算量大. 这里我们采用区间二分法, 即在一个步长区间内提取判据, 并优化算法. 经验证, 后者比前者的运算速度快 5 ~ 10 倍.

3.1 偏置电流的影响

图 2 给出了不同偏置电流 I_{bias} 下, VC SOA 的输入和输出光功率曲线, 其中图 2(a) 为透射模式, 图 2(b) 为反射模式, 初始相位失谐量 $\phi_0 = 3 \times 10^{-4}$, 从左到右分别对应 $I_{bias} = 0.98 I_{th}$ (阈值电流), $0.95 I_{th}$ 和 $0.93 I_{th}$ 的情形. 以图 2(a) $I_{bias} = 0.98 I_{th}$ 为例, 当偏置电流接近阈值电流时, 系统呈现出双稳态, 双稳环由 A-B-C-D (逆时针方向) 定出, 输入光功率在 $5.5 \mu W$ 和 $2.2 \mu W$ 处发生上下跳变. 可以看出, 随着偏置电流的增大 (逼近阈值) 上跳点左移, 即在更低的输入功率下出现跳变, 环宽逐渐变宽; 且输出功率增大, 相应地对比度增加; 与此相反, 当 $I_{bias} < 0.93 I_{th}$ 系统双稳消失. 不难看出, 与 EESOA 相比, 微腔所固有的阈值较低, 只需很低的输入光功率 (μW 量级的门限值) 就能触发状态的变化. 若用 VC SOA 作光开关或存储器件, 可有效地降低开关功率, 也是理想的光子集成开关元件. 同样, 图 2(b)

透射模式开关功率跳变点和环宽的变化规律与反射模式类似, 仅是输出功率与反射模式有所不同, 故下面的分析主要针对反射模式.

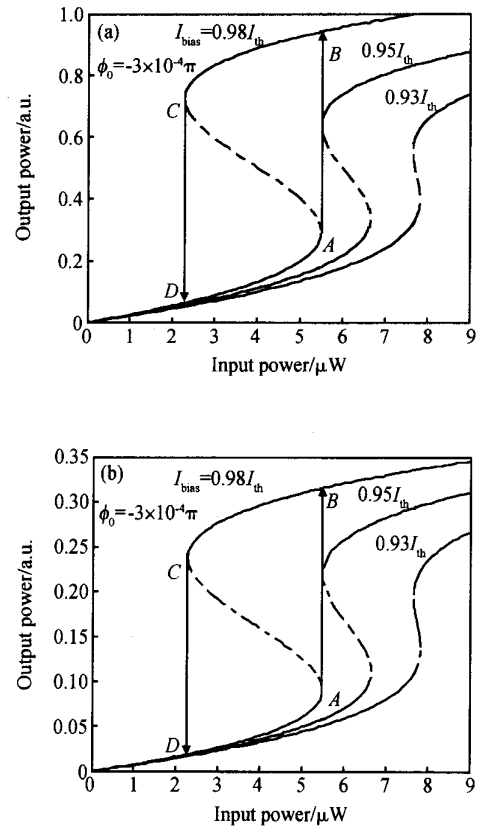


图 2 不同偏置电流下, 归一化输入和输出光功率关系曲线 (a) 反射模式; (b) 透射模式

Fig. 2 Normalized output power versus input optical power for various drive currents (a) Reflected mode; (b) Transmitted mode

从物理机理上讲, 由于载流子的改变直接影响折射率变化, 折射率的非线性又是引起双稳态的主要因素. 理论上, 载流子的变化情况也是人们关心的问题^[13]. 图 3 给出了不同偏置条件下载流子密度与输入功率的关系. 可以看出, 当偏置电流 $I_{bias} > 0.93 I_{th}$ 时, 载流子密度出现双值状态. 所不同的是, 双稳环为顺时针方向, 下跳点正对应于反射模式的上跳点. 这是由于输出功率上跳变时消耗大量载流子, 导致载流子密度出现反向跳变. 同样, 当偏置电流 $I_{bias} < 0.93 I_{th}$, 双稳现象消失, 这与图 2 的结果一致.

3.2 相位失谐量的影响

VC SOA 的单程增益小 (百分之几的量级), 谐振腔的带宽受 F-P 腔模的制约. 与 FPSOA 相比, 出

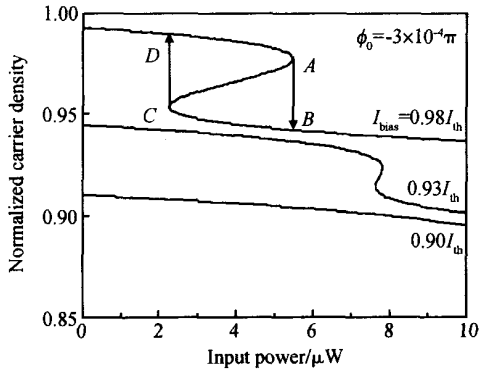


图 3 不同偏置电流下,归一化载流子密度与输入功率关系
 Fig. 3 Normalized carrier density versus input optical power for various bias currents

现双稳态所需初始相位失谐量 ϕ_0 更小,即波长偏移量更小,这将导致 VC SOA 对输入光信号的波长非常敏感.图 4 是 $I_{bias} = 0.95 I_{th}$,不同初始相位失谐条件下输入和输出特性曲线.当 $\phi_0 = -2.4 \times 10^{-4}$, -3.0×10^{-4} 和 -3.6×10^{-4} 时,出现双稳态所对应的输入功率分别为 2.6,5.7 和 8.1 μW .当输入信号光波长向长波长方向偏移时,会形成正反馈,谐振增强导致腔内产生更多的光子,在一定输入光强下,产生双稳态^[12].可以看出,相位失谐量越大,出现双稳的门限值越大(开关功率变大),双稳环变宽,输出功率和对比度变大.

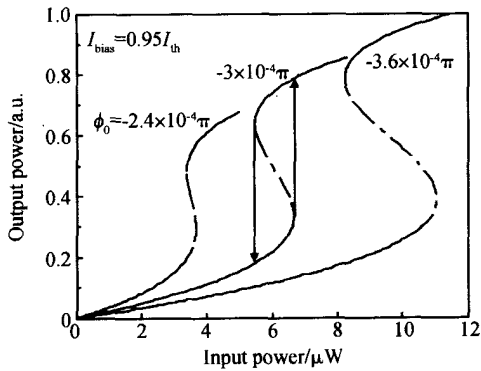


图 4 不同初始相位失谐量下,归一化输入和输出光功率关系曲线
 Fig. 4 Normalized output power versus input optical power for various initial phase detunings

同样,线宽展宽因子也是影响 VC SOA 双稳特性的一个重要参量.它反映了有源区折射率和增益变化大小之比,它的变化会引起增益的改变.图 5 给出了在偏置电流 $I_{bias} = 0.98 I_{th}$ 时,线宽展宽因子 b

不同的情况下,上跳变点随初始相位失谐量的变化规律.由图可见,随着线宽展宽因子增大,上跳变所需输入功率减小.也就是说,在更低的输入功率下即可出现双稳态,降低了开关功率.

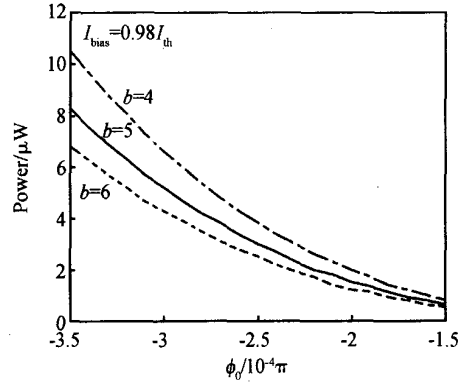


图 5 不同展宽因子下,上跳变点与初始相位失谐量的关系
 Fig. 5 Dependence of the threshold optical power for trigger bistability from lower state to higher state on initial phase detuning

为了进一步说明问题,图 6 给出了相同输入功率,不同偏置电流情况下输出功率随初始相位失谐量的变化情况.模拟结果表明,在阈值附近,适当地调控初始相位失谐量的大小可有效地控制系统的工作状态.同时,反映出随着偏置电流的降低,输出光功率峰向右移动,曲线呈现出更好的对称性,说明初始相位失谐量为负是系统实现双稳的必要条件.

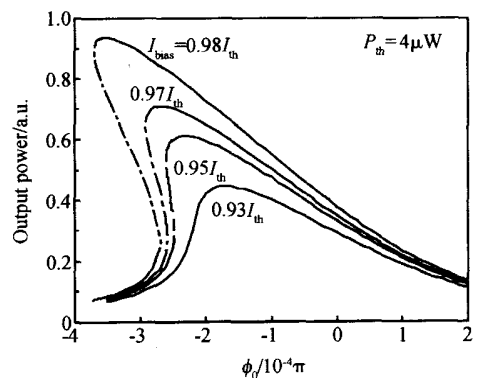


图 6 归一化输出功率与初始相位失谐量的关系
 Fig. 6 Output power versus initial phase detuning for various bias currents

3.3 顶端面反射率的影响和双稳环简并控制

VC SOA 单程增益小,为了弥补增益的不足,需要采用很高的端面反射率以提供足够的反馈,而端

面反射率又限制了增益带宽^[14,15]. 实际上, 改变端面反射率不仅会引起增益的变化, 而且会改变谐振腔的谐振条件. 取顶端 DBR 反射率 R_1 分别为 0.9900, 0.9910 和 0.9920, 偏置电流为 $0.95 I_{th}$, 输入与输出功率曲线如图 7 所示. 可以看出, 输出功率随着 R_1 的增大而降低, 而开关功率随着 R_1 的增大而增大, 同时对对比度减小, 环宽略有增加.

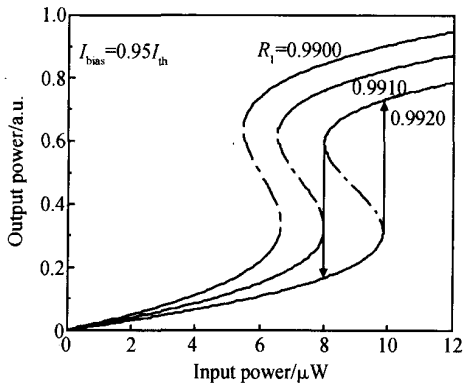


图 7 不同反射率下, 归一化输入与输出光功率关系

Fig. 7 Normalized reflected output power versus input optical power for various top reflectivities

值得注意的是, 适当选择控制参量(偏置电流、初始相位失谐量、线宽展宽因子、顶端面 DBR 反射率等), 可以控制 VCISOA 的门限值和双稳环的环宽. 图 8 是双稳环简并情形和 AND 逻辑真值表. 当双稳环简并时, 在上下两个区域(逻辑 0 和逻辑 1)系统可以实现逻辑 AND 的功能^[16,17]. 图中跳变点作为逻辑状态 A 和逻辑 B 状态的边界, 真值表为 AND 逻辑. 不难看出, AND 逻辑功能和开关效应对 VCISOA 控制参量有着不同的要求, 即偏置电流远离阈值, 初始相位失谐量越小, 越容易达到双稳环

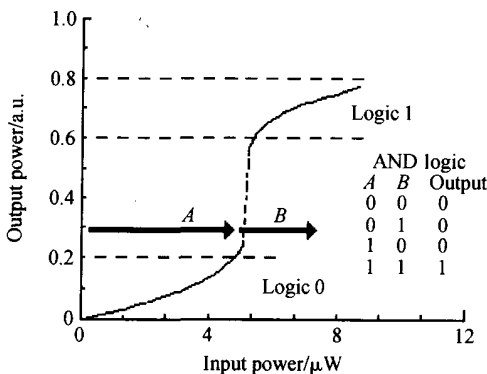


图 8 双稳环简并下的特性曲线和 AND 逻辑真值表

Fig. 8 Degenerate case of the optical bistability and true value table for AND logic gate

简并状态.

4 结论

综上所述, 综合考虑各个控制参量, 可以系统地改变 VCISOA 的双稳状态和逻辑功能. 研究结果表明, 输出功率特性的双稳环为逆时针方向, 载流子密度的双稳环为顺时针方向, 它们出现跳变点的位置相同; 初始相位失谐量为负是双稳态运行的必要条件. 一方面, (1) 偏置电流越接近阈值, 所需的开关功率越小, 双稳环越宽, 对比度越大; (2) 初始相位失谐量越大, 所需的开关功率越大, 双稳环越宽, 对比度越大; (3) 线宽展宽因子越大, 顶端面反射率越低, 所需的开关功率越小. 另一方面, 偏置电流远离阈值, 初始相位失谐量越小, 系统越容易达到双稳环简并状态, 为 AND 逻辑功能的实现提供了条件. 同样, 该分析方法可拓宽到双级联型 VCSELs 等垂直型微腔器件的双稳特性研究.

参考文献

- [1] Zheng Houzhi. Semiconductor microcavity: Physics and its applications. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(7) :481 (in Chinese) [郑厚植. 半导体微腔物理及其应用. 半导体学报, 1997, 18(7) :481]
- [2] Pan Wei, Zhang Xiaoxia, Luo Bin, et al. Vertical cavity surface emitting lasers. Physics, 1999, 28(4) :210 (in Chinese) [潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 垂直腔面发射半导体微腔激光器. 物理, 1999, 28(4) :210]
- [3] Tombling G, Saitoh T, Mukai T. Performance predictions for vertical cavity semiconductor laser amplifiers. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(11) :2491
- [4] Piprek J, Björln E S, Bowers J E. Optical gain-bandwidth product of vertical cavity laser amplifiers. Electron Lett, 2001, 37(5) :298
- [5] Royo P, Koda R, Coldren L A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: Comparison of Fabry-Pérot and rate equation approaches. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(3) :279
- [6] Björln E S, Riou B, Abraham P, et al. Long wavelength vertical-cavity semiconductor optical amplifier. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(2) :274
- [7] Calvez S, Clark A H, Hopkins J M, et al. 1.3 μm GaInNAs optically-pumped vertical cavity semiconductor optical amplifier. Electron Lett, 2003, 39(1) :100
- [8] Sánchez M, Wen P, Gross M, et al. Nonlinear gain in vertical-cavity semiconductor optical amplifiers. IEEE Photonics Technol Lett, 2003, 15(3) :507
- [9] Adams M J, Westlake H J, O'Mahony M J, et al. A comparison of active and passive optical bistability in semiconductors. IEEE J Quantum Electron, 1985, 21(9) :1498

- [10] Deng Guo, Pan Wei, Luo Bin, et al. Influence of spontaneous emission factor on the bifurcation and chaos behavior of VCSEL under large signal modulation. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(3):293 (in Chinese) [邓果, 潘伟, 罗斌, 等. 自发辐射因子对 VCSELs 在大信号调制下的分岔及混沌行为的影响. 中国激光, 2004, 31(3):293]
- [11] Pakdeevanich P, Adams M J. Measurements and modeling of reflective bistability in 1.55 μ m laser diode amplifiers. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(12):1894
- [12] Pan Z, Lin H, Dagenais M. Switching power dependence on detuning and current in bistable diode laser amplifiers. Appl Phys Lett, 1991, 58(7):687
- [13] Chen Jianguo, Li Yan, Lu Yang, et al. Study of bistable characteristics of long external cavity semiconductor lasers using expression of threshold carrier density. Acta Optica Sinica, 2000, 20(8):1015 (in Chinese) [陈建国, 李焱, 陆洋, 等. 用阈值表达式研究长外腔半导体激光器的双稳特征. 光学学报, 2000, 20(8):1015]
- [14] 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. Acta Optica Sinica, 2001, 21(8):975 (in Chinese) [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. 光学学报, 2001, 21(8):975]
- [15] Li Xiaofeng, Pan Wei, Luo Bin, et al. Study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting lasers with multiple external optical feedbacks. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(12):1450 (in Chinese) [李孝峰, 潘伟, 罗斌, 等. 多次外光反馈下 VCSELs 非线性动态特性理论研究. 中国激光 2004, 31(12):1450]
- [16] Zhang Bin, Ruan Gang, Xue Lechuan. Equivalent circuit model of mobile. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(4):349 (in Chinese) [张斌, 阮刚, 薛乐川. 单稳双稳态转变逻辑单元等效电路模型. 半导体学报, 1999, 20(4):349]
- [17] Niu Pingjuan, Guo Weilian, Liang Huilai, et al. DC model and bistable characteristics of resonant tunneling diode. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(9):1171 (in Chinese) [牛萍娟, 郭维廉, 梁惠来, 等. 谐振隧穿二极管的直流模型及其双稳态特性. 半导体学报, 2001, 22(9):1171]

Theoretical Study of Bistable and Logic Characteristics in Vertical Cavity Semiconductor Optical Amplifier *

Pan Wei¹, Zhang Xiaoxia², Luo Bin¹, Deng Guo¹, Li Xiaofeng¹, and Chen Jianguo³

(1 School of Computer and Communications Engineering, Optical Communication and Devices Research Laboratories, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(2 School of Optoelectronic and Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

(3 Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Based on the bistable model of a vertical cavity semiconductor amplifier (VCSOA), the optical bistability, controlling bistability, and logic characteristics of VCSOA are investigated by numerical simulations with typical experimental parameters. The results show that when the device is biased near its lasing threshold (exceed 93%) and the initial phase detuning is negative, the output optical power exhibits bistability. One hysteresis loop is observed with an power switching up and down in 5.5 μ W and 2.2 μ W, respectively, when the device is biased at 98%. Moreover, the bias current, linewidth enhancement factor, initial phase detuning, top mirror reflectivity of VCSOA, are used to control the optical power switching, the contrast ratio, and the wider of the hysteresis cycle, which can adjust the optical switching process.

Key words: semiconductor optical amplifiers; VCSOA; optical bistability states; power switching; degenerate of hysteresis loop

PACC: 4255P; 4265P; 4260D

Article ID: 0253-4177(2005)02-0357-06

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 10174057, 90201011), Applied Basic Research of Sichuan Province (No. 03JY029-048-1), and the Doctoral Program Foundation by Institute of Higher Education of China (No. 20030613007)

Pan Wei male, was born in 1959, professor. He is engaged in research on the quantum theory and semiconductor microcavity lasers.

Zhang Xiaoxia female, was born in 1961, professor. She is engaged in research on semiconductor physics and photoelectronic devices.

Received 14 January 2004, revised manuscript received 10 May 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics