

文章编号: 1001-3806(2006)05-0452-03

垂直腔半导体光放大器增益的理论分析

秦张淼, 罗斌*, 潘炜

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 针对研究增益饱和时, 现有的垂直腔半导体光放大器 (VCSOA) 速率方程模型在确定输入信号的功率注入因子方面存在难题, 根据法布里-珀罗腔边界条件, 从行波方程和与位置相关的载流子方程出发, 引入随轴向位置发生变化的增益增长因子刻画微腔内的驻波效应, 构建出 VCSOA 的增益模型。利用该模型通过求方程的自洽得到了腔内载流子、光子的分布, 并分析了反射增益, 其结果与已报道的理论及实验基本一致。

关键词: 激光器; 增益; 行波方程; 垂直腔半导体光放大器

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Theoretical analysis of the gain of vertical cavity semiconductor optical amplifier

Q N Zhang, m iao, LUO B in, PAN Wei

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract Considering the fact that power injection factor of the input signal is hard to evaluate when gain saturation is analyzed with existing rate equation models of vertical cavity semiconductor optical amplifier (VCSOA) according to the boundary condition of Fabry-Perot resonator, a gain model of VCSOA is established by using traveling wave equation and position dependent carrier equation and employing gain enhancement factor which varies with axial position to describe the standing wave effect in a mirror cavity. After finding the self-consistent solution of equations based on the model, the distributions of carrier and photon in cavity are presented. Meanwhile, the reflection gain is investigated and agrees with the theoretical and experimental data.

Key words lasers; gain; traveling wave equation; vertical cavity semiconductor optical amplifier

引 言

光放大器是光通信系统的重要组成部分, 作为其中一员, 垂直腔半导体光放大器 (vertical cavity semiconductor optical amplifier, VCSOA) 因其尺寸小、对光纤的耦合效率高、偏振不敏感等特点而具有广泛用途, 诸如实现光开关, 光互联以及并行光数据处理等^[1]。

在 VCSOA 的理论研究方面, 前期的文献中^[2-4]主要是以法布里-珀罗 (F-P) 腔放大器增益公式为基础, 通过有效腔长、单程增益以及分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 的反射率等参量来描述增益特性; 同时, 为了研究增益饱和, 还必须考察腔内载流子与光子的相互作用, 这是通过结合速率方程模型来实现的, 通常, 在速率方程中忽略了腔内光子和载流子的分布以方便计算, 此时, 关键问题是如何确定输

入光信号对腔内光子数的贡献。然而在此问题上, 现有 VCSOA 速率方程的处理方法值得商榷: TOMBLING 等^[2]把注入到腔内的光子数作为已知, PIPREK 等^[3]认为输入光信号的功率注入因子为 $1 - R_f$, BJÖRLIN 等^[4]则是取了参变量 η 代表功率注入因子。而事实上, 早在 1985 年, ADAMS 等人^[5]针对长腔半导体激光放大器, 在忽略腔内载流子分布的前提下, 曾经导出过腔内光子数与输入光信号功率之间的关系, 其表达式比文献 [3]、文献 [4] 中的复杂得多, 这从侧面证明, 输入光信号的功率注入因子是否可以取为常数处理需要重新考虑。

针对上述原因, 作者的思路是直接 F-P 腔边界条件出发, 并考虑载流子和光场在传输方向上的分布, 这样可以避免确定功率注入因子。在实际处理过程中, 利用行波方程研究光场分布, 借助与位置相关的载流子方程考察光子与载流子的相互作用; 同时, 注意到 VCSOA 这样一个微腔结构, 它通过将多量子阱堆生长在腔内驻波波峰处来增强单程增益, 驻波效应显得尤为重要, 引入随位置发生变化的增益增长因子^[6]刻画驻波效应; 而后, 根据 F-P 腔边界条件通过求方程的自洽来研究 VCSOA 的增益及其饱和特性。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20030613007); 国家自然科学基金资助项目 (10174057)

作者简介: 秦张淼 (1981-), 男, 硕士研究生, 现从事光通信方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: hcl@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2005-09-30 收到修改稿日期: 2006-03-23

1 理论模型

VC SOA 由两端的高反射率 DBR 提供深度反馈, 将 DBR 用等反射率的反射镜替代, VC SOA 可等效为相隔长度为有效腔长 L_c 的两个反射镜, 如图 1 所示,

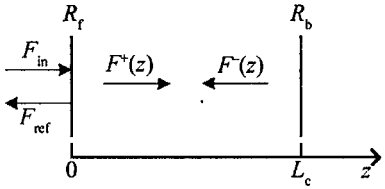


Fig 1 An equivalent model for VC SOA showing the incident reflected signal field

记顶部、底部镜面反射率分别为 R_t, R_b , 设腔内轴向位置变量为 z . F_{in} 及 F_{ref} 分别为 $z=0$ 处的输入、输出信号场。腔内信号场以及光子、载流子的密度满足^[3, 5]:

$$\frac{dF^\pm(z)}{dz} = \pm \frac{g(z)}{2} F^\pm(z) \mp k F^\pm(z) \quad (1)$$

$$S(z) = |F^+(z) + F^-(z)|^2 \quad (2)$$

$$\frac{j_p}{eL_a} = [AN(z) + BN^2(z) + CN^3(z)] - \xi(z)g_m(z)v_g S(z) \quad (3)$$

(1) 式中, $F^\pm(z)$ 为腔内信号场, 正负号分别对应正负 z 方向; $g(z)$ 是 z 处净增益; k 是介质中的传播常数, $k = n_{eff} \cdot 2\pi / \lambda_0$, n_{eff} 是介质有效折射率, λ_0 是真空中信号波长。(2) 式中, $S(z)$ 为 z 处光子密度。(3) 式中, j_p 为有效注入电流密度, e 是电子电量, L_a 是腔内量子阱总厚度, $N(z)$ 为 z 处载流子密度, A, B, C 分别为表面缺陷复合、自发辐射、俄歇复合系数, $\xi(z)$ 是 z 处增益增长因子, $g_m(z)$ 为 z 处材料增益, v_g 是光信号群速度, $v_g = c/n_g$, c 是真空中光速, n_g 为介质群折射率。

设腔内各个量子阱分别对应的增益增长因子为 $\xi(j)$ ($j=1, 2, \dots, m$; m 为量子阱总个数), $\xi(j)$ 可表示为^[6]:

$$\xi(j) = \frac{\int_{h_l(j)}^{h_r(j)} \cos^2(kz) dz}{\int_0^{L_c/(2n_{eff})} \cos^2(kz) dz} \times \frac{\lambda_0 / (2n_{eff})}{t} = \frac{[z + \frac{1}{2k} \sin(2kz)]|_{h_l(j), h_r(j)}}{t} \quad (4)$$

式中, $h_l(j), h_r(j)$ 分别为第 j 个量子阱的左、右端点位置, t 是单个量子阱的厚度。材料增益^[7]和净增益可分别写为:

$$g_m(z) = g_0 \ln \left[\frac{N(z)}{N_{tr}} \right] \quad (5)$$

$$g(z) = \xi(z)g_m(z) - \alpha_c \quad (6)$$

式中, N_{tr} 为透明载流子密度, g_0 是材料增益参量。 α_c 为腔内平均损耗系数。需要说明的是, 只有在量子阱

处, $N(z), \xi(z), g_m(z)$ 才有意义。

VC SOA 的两端信号场以及反射增益 G_r 满足^[5]:

$$F^+(0) = F_{in} \sqrt{1-R_t} + \sqrt{R_t} F^-(0) \quad (7)$$

$$F^-(L_c) = \sqrt{R_b} F^+(L_c) \quad (8)$$

$$F_{ref} = \sqrt{R_t} F_{in} \exp(-i\pi) + \sqrt{1-R_t} F^-(0) \quad (9)$$

$$G_r = |F_{ref}|^2 \cdot (A_{in} v_g h c / \lambda_0) / P_{in} \quad (10)$$

对于 F_{in} 有 $|F_{in}|^2 = P_{in} / (A_{in} v_g h c / \lambda_0)$ 成立, P_{in} 为输入信号功率, A_{in} 为信号横截面面积, h 是普朗克常数。在满足 (7) 式、(8) 式的前提下, 使 (1) 式 ~ (6) 式得到自洽可求出 $F^-(0)$, 将其代入 (9) 式、(10) 式可得到反射增益 G_r 。考虑到信号场 $F^\pm(z)$ 为复数, 求自洽必须进行二维搜索; 在量子阱处求解 (1) 式时, 为保证精度须分割量子阱, 并确保每个分段上的载流子、光子密度满足 (3) 式。

作为放大器, VC SOA 的工作电流必须小于其阈值, 所以有必要考察其阈值电流。根据 (1) 式、(3) 式及 (5) 式 ~ (8) 式不难得到阈值有效注入电流密度 $j_{p, th}$ 以及阈值电流 I_{th} :

$$N_{th} = N_{tr} \cdot \exp \left\{ \left[\frac{1}{L_c} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_t R_b}} \right) + \alpha_c \right] \cdot \frac{1}{\xi \Gamma g_0} \right\} \quad (11)$$

$$j_{p, th} = eL_a \cdot (AN_{th} + BN_{th}^2 + CN_{th}^3) \quad (12)$$

$$I_{th} = j_{p, th} \cdot A_{in} \quad (13)$$

式中, ξ 为平均增益增长因子, Γ 为轴向限制因子, 可写为 $\Gamma = L_a / L_c$ 。

2 数值模拟

以文献 [3] 中的 VC SOA 为例, 本文中固定有效腔长 L_c 分析谐振条件下 VC SOA 的增益。取驻波半波数 $M=11$ 及 $n_{eff}=3.2$, $L_c=2.2365 \mu m$, 根据 $M \lambda_0 / (2n_{eff}) = L_c$, 可得到 λ_0 , 其它参量为^[3, 7]: $R_b=0.999$, $A_{in}=12.6 \mu m^2$, $t=6.3 nm$, $L_a=132.3 nm$, $\xi=1.75$, A, B, C 分别为 $1 \times 10^8 s^{-1}$, $1 \times 10^{-10} cm^3 \cdot s^{-1}$, $3 \times 10^{-29} cm^6 \cdot s^{-1}$, $n_g=4$, $\alpha_c=15 cm^{-1}$, $g_0=2162 cm^{-1}$, $N_{tr}=2.3 \times 10^{18} cm^{-3}$ 。

图 2 中, 腔内形成半波数为 11 的驻波, 并且在每个多量子阱堆的中心位置 (图中箭头处), 光子密度达到极大值。图 3 为腔内 21 个离散量子阱处的载流子

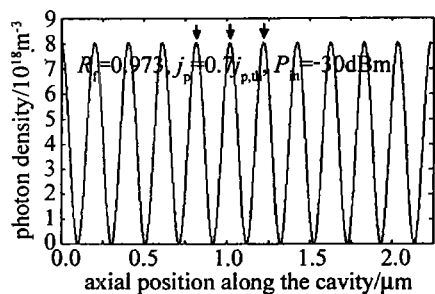


Fig 2 Photon density versus axial position

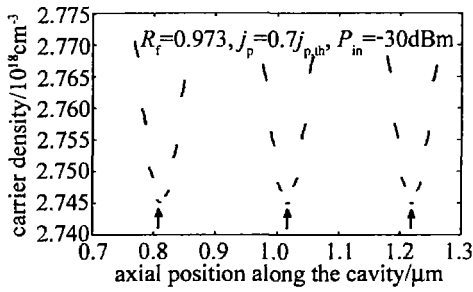


Fig 3 Carrier density versus axial position

密度图,每个量子阱处的载流子密度有一定的变化,是因为对量子阱作了分段处理,可以看出,载流子密度在3个多量子阱堆上都先减小,然后于多量子阱堆中心位置(图中箭头处)达到极小值,接着再增大。

图4中3种情况下的有效注入电流密度 j_p 都为 $R_r = 0.973$ 所对应的 $j_{p,th}$ 的0.7倍。可以发现,随着 R_r 的增加,小信号增益变大,而饱和输入功率点降低(从K点的-13.7dBm到L点的-18dBm再到M点的-22.5dBm)。图5中,随着 j_p 的增加,反射增益变大,同时饱和输入功率点降低(从A点的-22.5dBm到B点的-25.2dBm再到C点的-28.2dBm)。

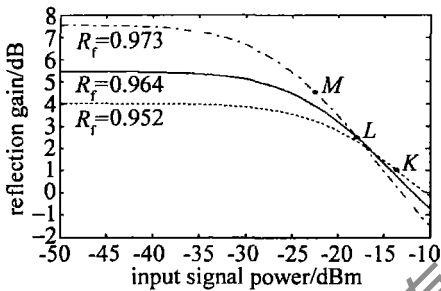


Fig 4 Reflection gain versus input signal power with different top mirror reflectivity R_r

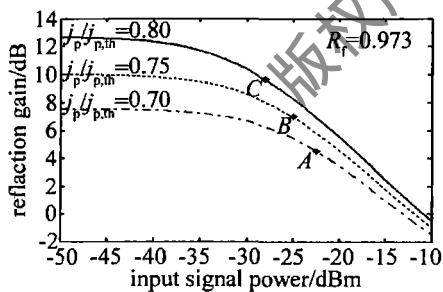


Fig 5 Reflection gain versus input signal power with the different ratio of j_p to $j_{p,th}$

对照图4和图5可以看出,降低 R_r 并增大 j_p 可同时改善反射增益和饱和输入功率点,这与相关理论及实验^[8]相符。本文中 j_p 是描述电抽运的,根据(11)式~(13)式可求得 R_r 取0.973,0.964,0.952时的阈值

电流分别为0.65mA,0.8mA,1.08mA,由于VCSSOA阈值电流比较低,因而其饱和输入功率比较小,亦有实验^[9]表明,电抽运下的垂直腔放大器的饱和输入功率比较低。相比之下,文献[8]中的饱和输入功率比较高,是因为采用了光抽运,光抽运的载流子产生机制有别于电抽运,比如说,光抽运可以在量子阱处直接产生均匀的载流子^[8]。

3 结论

为了避免确定输入信号的功率注入因子,考虑载流子分布,从F-P腔边界条件出发,引入随位置发生变化的增益增长因子反映微腔内的驻波效应,利用行波方程以及与位置相关的速率方程构建出VCSSOA的增益模型。应用该模型,选取典型VCSSOA,得到了腔内载流子、光子的轴向分布,同时分析了反射增益,模拟结果验证了:降低顶部镜面反射率并提高有效注入电流密度,可同时改善反射增益以及饱和输入功率点。

参考文献

- [1] DENG G, PAN W, LUO B *et al*. Theoretical analysis of the bistability control of bistability in VCSSOA [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 74~76 (in Chinese).
- [2] TOMBLING C, SAITOH T, MUKAIT. Performance predictions for vertical cavity semiconductor laser amplifiers [J]. *IEEE J Q E*, 1994, 30(11): 2491~2499.
- [3] PIPREK J, BURLIN E S, BOWERS J E. Design and analysis of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(1): 127~134.
- [4] BURLIN E S, KUMURA T, BOWERS J E. 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.
- [5] ADAM S M, J COLLINS J V, HENNING I D. Analysis of semiconductor laser optical amplifiers [J]. *Proc IEEE*, 1985, 132(1): 58~63.
- [6] CORZINE S W, GEELS R S, SCOTT J W *et al*. Design of Fabry-Perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure [J]. *IEEE J Q E*, 1989, 25(6): 1513~1524.
- [7] YONG J C L, RORISON J M, WHITE I H. 1.3 μ m quantum-well InGaAsP, AlGaInAs and InGaAsN laser material gain: a theoretical study [J]. *IEEE J Q E*, 2002, 38(12): 1553~1564.
- [8] BURLIN E S, RYU B, ABRAHAM P *et al*. Long wavelength vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(2): 274~281.
- [9] LEWEN R, STREUBEL K, KARLSSON A *et al*. Experimental demonstration of a multifunctional long-wavelength vertical cavity laser amplifier detector [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(8): 1067~1069.