

文章编号: 1001-3806(2007)02-0137-04

垂直腔半导体光放大器带宽特性研究

王 刚, 罗 斌*, 潘 炜

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了研究垂直腔半导体光放大器 (vertical cavity semiconductor optical amplifiers, VCSOA) 中抽运光功率、分布布喇格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 周期数以及输入信号强度对其带宽特性的影响, 采用传输矩阵法进行了数值模拟。计算模型中考虑了载流子和光强沿纵向的分布, 以及腔内介质折射率的不均匀性对光波传输的影响。得到的结果与文献中的结论符合较好。结果表明, 提高 VCSOA 的抽运水平可以增大其峰值增益, 同时会缩小其增益带宽; 减小 DBR 周期数可以获得更大的增益带宽积。另外, 输入光信号强度对 VCSOA 带宽的大小也有较大的影响。

关键词: 激光器; 垂直腔半导体光放大器; 带宽; 传输矩阵; 增益

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Study on optical bandwidth characteristic of vertical cavity semiconductor optical amplifiers

WANG Gang, LUO Bin, PAN Wei

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

Abstract Based on the transfer matrix method, the effects of the pump optical power, the distributed Bragg reflector (DBR) periods and the intensity of the input optical signal on the optical bandwidth characteristics of vertical cavity semiconductor optical amplifiers (VCSOAs) are simulated numerically. The computer model includes the longitudinal distribution of carrier and optical intensity and the influence of the nonuniformity of the refractive index of the material inside the cavity on the propagation of the optical signal. The obtained results agree well with the conclusion of previous literatures. The results show that the enhancement of the pump level will increase the peak gain of VCSOAs and decrease the optical bandwidth simultaneously, reducing the DBR periods will induce larger optical gain bandwidth product. In addition, the intensity of input optical signal will obviously affect the range of the optical bandwidth of VCSOAs.

Key words lasers; vertical cavity semiconductor optical amplifiers; bandwidth; transfer matrix; gain

引 言

随着半导体微腔技术的发展和成熟, 垂直腔半导体光放大器 (VCSOA) 引起了人们越来越多的关注^[1-4]。而在现代光纤通信系统中, 光放大器的 3dB 增益带宽是影响系统性能的重要指标之一, 特别是在高速通信时光接收机中的前置放大器可以接收的最高数据码率将直接受制于其光学带宽的大小^[1]。另外, 与行波放大器不同的是, VCSOA 的增益带宽主要受限于其 F-P 线宽。为此, 需要对 VCSOA 的带宽特性做进

一步的理论分析。在现有对 VCSOA 带宽的理论分析中, 大多是应用基于平均场的模型。即假设有源区中载流子是均匀分布的, 然后使用 F-P 增益公式^[5]或传输矩阵法^[6]计算放大器的带宽。

针对 VCSOA 所采用的周期增益结构 (PGS), 最近笔者提出了一个关于 VCSOA 的稳态模型^[7]。和其它平均场模型不同的是, 该模型考虑了载流子和光强在有源区中的纵向分布和光波在有源区中传输时不同介质的界面上由于折射率的差异对光场反射的影响, 应用薄膜光学中的分层介质理论将整个 VCSOA (包括前后两个 DBR 反射镜和中间的有源区) 视为一个整体进行计算。同时, 这一模型无需引入和量子阱在腔内位置有关的增益增强因子而能自然地反映出存在于 VCSOA 中的驻波效应^[8]。作者将在这些前期工作的基础上, 使用这一新模型对 VCSOA 的带宽特性进行理论分析, 不仅能够得出平均场模型的结论, 还可以分析输入光信号强度对放大器增益带宽的影响。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20030613007)

作者简介: 王 刚 (1979-), 男, 博士研究生, 主要从事光通信中光器件的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: hck@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-01-17; 收到修改稿日期: 2006-03-21

1 理论分析

图 1 是整个 VC SOA 的示意图。在模型中将放大

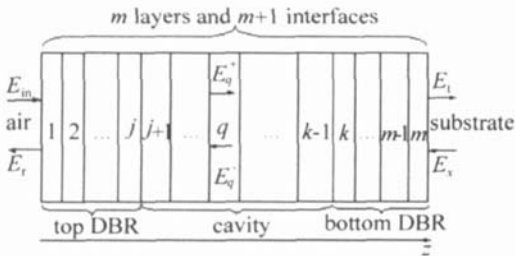


Fig 1 Description of general VC SOA structure, the symbol q represents the q th layer in the structure along z axis. E_{in} , E_r , and E_t denote the optical fields of input, reflected and transmitted by VC SOA respectively.

器视为一个多层介质膜系,包括顶部和底部两个 DBR 反射镜和中间的有源区,各层以其复折射率 $\tilde{n}_j = n_j - i\gamma_j$ 来标识, n_j 和 γ_j 分别为第 j 层的折射率和消光系数,而 $\gamma_j = \frac{\alpha_j - g_j}{2k_0}$, α_j , g_j , 和 k_0 分别是该层的吸收系数、增益系数和真空中的波矢。按这种划分,假定整个放大器沿纵向共有 M 层组成。同时两个 DBR 反射镜均被视为无吸收介质,而且只考虑正入射的情形。这样在放大器中传输的光场可以被分成沿 $+z$ 和 $-z$ 两个方向传播的行波分量。

假设入射光波进入的第 1 个量子阱处于图 1 的第 q 层,根据稳态载流子速率方程:

$$\frac{I}{eV} = AN_q + BN_q^2 + CN_q^3 + v_g g_q S_q \quad (1)$$

可以得到该量子阱中的载流子浓度 N_q ,其中 I 为有效注入电流, e 为电子电量, V 为有源区体积, A , B 和 C 分别表示非辐射复合、辐射复合以及俄歇复合系数, v_g 为群速度, g_q 和 S_q 分别是该层的增益和光子密度。在这里采用对数关系来表示量子阱材料中增益与载流子浓度的关系,即 $g_q(N_q) = g_0 \ln \left[\frac{N_q + n_s}{N_r + N_q} \right]$, N_r 是透明载流子浓度, g_0 和 N_s 是可以通实验拟合得到的参数。同时,由于所研究的 VC SOA 采用的是光抽运方式,作者采用文献 [9] 中的 (5) 式来表示抽运光功率 P_p 和等效注入电流 I 之间的对应关系: $I = \frac{1}{30} \times e L_a T_p P_p \times \frac{\lambda_p}{hc} \times \frac{1 - \exp(-\alpha_{qw} L_a)}{L_a}$ 。其中,透过率 T_p 近似为 1, λ_p 为抽运光波长, h 和 c 分别是普朗克常数和光速, α_{qw} 为量子阱材料对抽运光的吸收系数, L_a 为所有量子阱的长度之和。

根据薄膜光学中的分层介质理论^[10],图 1 中任意相邻两层介质中的前、后向行波场可用下面的矩阵关系表示:

$$\begin{bmatrix} E_j^+ \\ E_j^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_j} \begin{bmatrix} e^{\delta_j} & r_j e^{\delta_j} \\ r_j e^{-\delta_j} & e^{-\delta_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{j+1}^+ \\ E_{j+1}^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $t_j = \frac{2\tilde{n}_{j+1}}{\tilde{n}_j + \tilde{n}_{j+1}}$ 和 $r_j = \frac{\tilde{n}_{j+1} - \tilde{n}_j}{\tilde{n}_{j+1} + \tilde{n}_j}$ 为第 j 层与第 $j+1$ 层

之间界面上的振幅透射和反射系数, $\delta_j = \frac{2\pi\tilde{n}_j d_j}{\lambda_0}$ 为第 j 层的复位相厚度, d_j 为该层实际厚度, λ_0 为信号波长(这里假设输入为单频信号)。同时在输入和输出界面上,有下列关系:

$$\begin{bmatrix} E_{in} \\ E_r \end{bmatrix} = \frac{1}{t_0} \begin{bmatrix} 1 & r_0 \\ r_0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} E_m^+ \\ E_m^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_m} \begin{bmatrix} e^{i\delta_m} & r_m e^{i\delta_m} \\ r_m e^{-i\delta_m} & e^{-i\delta_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ E_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, t_0 , r_0 和 t_m , r_m 分别是输入和输出界面上的振幅透射和反射系数。用 $E_{in} = \sqrt{\frac{P_{in}}{A_{in}}}$ 表示入射场强, E_r 和 E_t 为反射和透射场强, P_{in} 为输入光信号功率, A_{in} 为输入信号横截面积。根据光波的相干叠加原理, (1) 式中的 S_q 可归一化表示为 $S_q = |E_q^+ + E_q^-|^2 \frac{\lambda_0}{hcv_g}$ 。这样反复利用矩阵关系 (2) 式和 (3) 式,可以得到 S_q 代入 (1) 式就得到一个关于 N_q 的非线性方程,解出 N_q 即得到 g_q 。依次类推,可以求得各层量子阱中的载流子浓度和增益,进而可以得到关于整个放大器的传输矩阵关系:

$$\begin{bmatrix} E_{in} \\ E_r \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_t \\ E_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_t \\ E_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, T 即是整个放大器的传输矩阵。在 $E_s = 0$ 这一特定边界条件下,通过 Gaussian-Newton 法可以求出在一定的输入功率 P_{in} 下反射场强 E_r 和透射场强 E_t 的值。而 VC SOA 的增益可以通过下面关系求出:

$$G_r = \left| \frac{E_r}{E_{in}} \right|^2, \quad (\text{反射模式}) \quad (6)$$

$$G_t = \frac{n_s}{n_0} \left| \frac{E_t}{E_{in}} \right|^2, \quad (\text{传输模式}) \quad (7)$$

式中, n_0 和 n_s 分别为空气和基底的折射率。利用 (1) 式 ~ (7) 式,可以通过数值模拟得到放大器不同信号波长的增益(即增益谱),进而可以对其 3dB 带宽进行研究。

2 结果与讨论

本文中的研究是在文献 [5] 中所给出的 VC SOA 的器件结构基础上进行的。其中,不同材料的折射率采用如下取值:以 GaAs/AlAs 为材料的 DBR 结构中

高、低介质折射率分别为 3.45 和 2.89, 有源区基层 InP 的材料折射率为 3.21, InAs_{0.5}P_{0.5} 量子阱和 In_{0.8}Ga_{0.2}P 势垒的折射率为 3.36 和 3.3, GaAs 基底折射率为 3.45。另外, 各量子阱和势垒的厚度均为 6.3nm, 有源区实际厚度为 1μm, 内部的两对对称基层厚度分别为 0.25022μm 和 0.1055μm。在数值计算中, 其它参数取值为: $A = 10^8 s^{-1}$, $B = 10^{-10} cm^3 / s$, $C = 2 \times 10^{-29} cm^6 / s$, $N_r = 1.1 \times 10^{18} cm^{-3}$, $N_s = -0.63 \times 10^{18} cm^{-3}$, $A_{in} = 12.5 \mu m^2$, $L_a = 132.3 nm$, $\lambda_0 = 1.3 \mu m$, $\alpha = 15 cm^{-1}$, $\lambda_p = 980 nm$ 。

首先研究抽运光功率对放大器带宽的影响。图 2 中给出了在输入功率 $P_{in} = -30 dBm$ 、顶部和底部 DBR

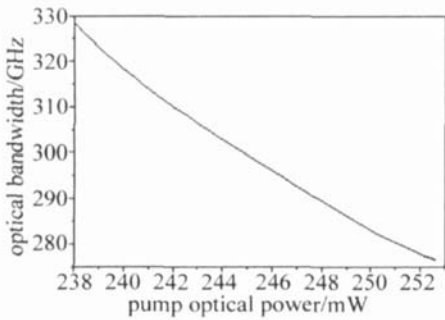


Fig 2 Optical bandwidth versus pump power in reflection mode with 8 top DBR periods and $P_{in} = -30 dBm$

周期数分别为 8.25 时, 在反射模式下放大器的光学带宽与抽运强度的对应关系。图 3 描述了在上述 DBR

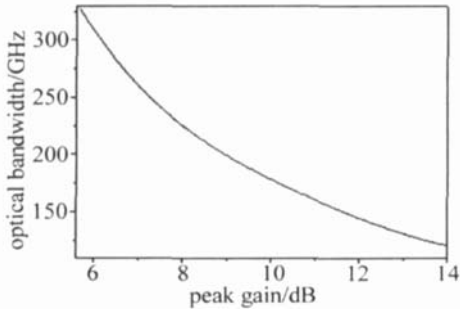


Fig 3 Optical bandwidth versus peak reflection gain with 8 top DBR periods

周期数的情况下 VC SOA 的 3dB 光学带宽随其峰值增益的变化关系。此时, VC SOA 的激射阈值为 716mW。从图 2 中可以看到, 随着抽运强度的增大, VC SOA 的光学带宽随之减小。这是因为随着抽运光功率的增加, VC SOA 有源区内载流子浓度增加而使得其腔内信号单程增益增大, 进而放大器增益得到增强而带宽减小。从图 3 中也可以清晰地看出, VC SOA 的峰值增益和其带宽之间的反相关关系, 即要获得更大的带宽必然是以减小信号增益为代价的, 反之亦然。图 2 和图 3 中的数值结果都与文献 [5] 中的结论基本相符。

下面讨论在反射模式下顶部 DBR 周期数 (反射

率)对 VC SOA 带宽特性的影响。根据文献 [11] 中对增益带宽积的定义, 即峰值增益的平方根与带宽的乘积, 研究了 VC SOA 在反射模式下增益带宽积随顶部 DBR 周期数的演变情况, 计算结果如图 4 所示。从图

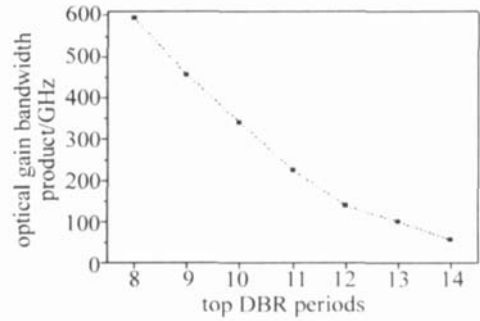


Fig 4 Top DBR periods versus optical gain bandwidth product in reflection mode

中可以看出, 较小的 DBR 周期数对应着较大的增益带宽积, 这和文献 [11] 中的结论是相符合的。特别地, 用传输矩阵法计算可得当顶部 DBR 周期数为 8 时, 其反射率为 0.913, 对应的增益带宽积为 593GHz。对比文献 [11] 中的图 2 这一结果非常接近文献中的实验数据和理论计算所得的 600GHz。当顶部 DBR 周期数为 12 时, 其反射率为 0.978, 增益带宽积为 138GHz。这也接近文献 [11] 中的实验数据和理论预测的 140GHz。当顶部 DBR 周期数为其它取值时, 本文中模拟结果也和文献 [11] 中的理论计算结果符合较好。

另外, 一般在对 VC SOA 带宽特性的讨论中, 很少考虑输入信号光功率这一因素对放大器带宽的影响。事实上, 由于输入信号的强度直接影响有源区内的载流子浓度, 所以, 即使在 VC SOA 的非饱和工作区 (即其增益水平大于峰值增益的一半), 工作在不同输入信号强度下放大器的带宽是不一样的。下面就讨论输入光信号功率对 VC SOA 带宽特性的影响。图 5 描述

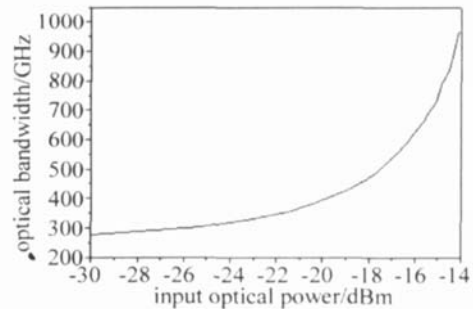


Fig 5 Input optical intensity versus optical bandwidth with $P_p = 253mW$ in reflection mode

的就是在顶部和底部 DBR 周期分别为 8 和 25 时, VC SOA 的 3dB 带宽随输入功率的演变趋势。可以看出, 随着输入功率的增加, VC SOA 的量子阱中载流子浓度下降, 继而导致其增益水平下降, 同时带宽随之增加。这也再次印证了前面的结论, 即 VC SOA 的增益

和其带宽呈现出一种反相关关系。同时可以注意到,在输入功率从 -30dBm 增加到 -15dBm 时,放大器的带宽可以增加几百兆赫兹,这也说明在一定条件下放大器的输入功率水平对其带宽有着比较大的影响。

3 结 论

采用一种新模型对垂直腔半导体光放大器(VCSOA)的带宽特性进行了研究,模型中考虑了载流子和光子沿腔长方向的不均匀分布以及 VCSOA 腔内介质折射率的不连续性。数值仿真结果表明,提高 VCSOA 的抽运水平可以增大其峰值增益,但同时将缩小其增益带宽;减小 VCSOA 的 DBR 周期数(即反射率),可以扩展其有效带宽范围,但其峰值增益将减小;要获得更大的增益带宽积需要减小 DBR 周期数,而同时也需要提高抽运强度以维持放大器正常工作的增益水平;另外,在一定条件下输入光信号强度对 VCSOA 带宽的大小也有着比较大的影响。数值结果与文献中的结论符合较好,对不同应用场合下优化 VCSOA 的性能有一定指导意义。

参 考 文 献

- (上接第 116页)
- [1] KMURA T, BJORLN E S, CHOU H F *et al* Optically preamplified receiver at 10, 20 and 40Gbit/s using a 1550nm vertical cavity SOA [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2005 17(2): 456~458
 - [2] NIX W, LU J HE A Zh. Study of the attenuation of laser induced plasma shock wave [J]. International Journal Optoelectronics 1998 12(2): 37~39
 - [3] LU J NIX W, HE A Zh. Laser interactions with materials physics [M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 111~134 (in Chinese).
 - [4] MAHER W E, HALL R B. Experimental study of ignition and propagation of laser-supported detonation waves [J]. J A P, 1974 45(5): 2138~2145.
 - [5] MAHER W E, HALL R B. An interferometric investigation of laser supported absorption waves [J]. J A P, 1975, 46(2): 761~772
 - [6] LU J NIX W, HE A Zh. Investigation of ignition and propagation features of laser-supported—detonation wave using interference pattern [J]. Laser Technology, 1996, 20(2): 74~77 (in Chinese).
 - [7] COLE G, BJORLN E S, WANG C S *et al* Widely tunable bottom-emitting vertical cavity SOAs [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2005 17(12): 2526~2528
 - [8] JIA X J LUO B, PAN W *et al* Research of gain of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on transfer matrix method [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 377~379 (in Chinese).
 - [9] DENG G, PAN W, LUO B *et al*. Theoretical analysis of loop width control of bistability in VCSOA [J]. Laser Technology, 2005 29(1): 74~76 (in Chinese).
 - [10] PIPREK J, BJORLN E S, BOWERS J E. Design and analysis of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(1): 127~134
 - [11] LIM S F, CHANG-HASNAN C J A proposal of broadband width vertical cavity laser amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1995 7(11): 1240~1242
 - [12] WANG G, LUO B PAN W *et al* A transfer matrix based analysis of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. Chinese Physics Letters 2005 22(10): 2561~2564
 - [13] 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): 1513~1523
 - [14] ZHAO Zh, PAN W, LUO B *et al* Numerical analysis on gain properties of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. Laser & Infrared, 2004 34(2): 116~118 (in Chinese).
 - [15] TANG J F, ZHENG Q. Applied thin film optics [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. 65 (in Chinese).
 - [16] PIPREK J, BJORLN E S, BOWERS J E. Optical gain-bandwidth product of vertical cavity laser amplifiers [J]. Electron Lett 2001 37(5): 298~299.
 - [17] MORIK, KOMURASAKI K. Influence of the focusing f number on the heating regime transition in laser absorption waves [J]. J A P, 2002 92(10): 5563~5567.
 - [18] BUKNO A, IJIN A A, GDLK S S *et al* Investigation of stark shift and shock waves parameters relationships in laser plasmas generated on the surfaces of solid targets [J]. SPIE, 2002, 4748: 184~190
 - [19] YABET, HIPPES C, AOKI K *et al* Laser derived vehicles from inner-space to outer-space [J]. Appl Phys 2003, A77: 243~249.
 - [20] LU J NIX W, SHEN Zh H. Physics mechanisms of ignition of a high power laser supported detonation wave [J]. SPIE, 1997, 3173: 168~172
 - [21] ZHANG Y L, LING Y W. Explosive gas dynamics foundation [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1986: 317~319 (in Chinese).