

基于垂直谐振腔结构的半导体光放大器理论分析*

赵 峥^{1,2,3} 潘 炜^{1,2} 罗 斌¹ 邓 果^{1,2} 李孝峰^{1,2}

(1 西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都 610031)

(2 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 成都 610054)

(3 西南交通大学理学院, 成都 610031)

摘要 由新型垂直腔半导体光放大器(VCSOAs)器件结构出发,在反射模式和透射模式两种情况下,计算了VCSOAs的分布布拉格反射堆(DBR)反射率、单程增益与增益、带宽的关系,其中DBR反射率的增大伴随着增益的上升,但也伴随着带宽的减小.通过引入增益-带宽积的概念,以均衡增益与带宽.计算中表明:10 dB以上增益,50 GHz以上带宽可以实现.计算结果与文献实验相吻合,对优化VCSOAs的结构设计和性能有所裨益.

关键词 垂直腔半导体光放大器;增益;带宽

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

0 引言

垂直腔面发射激光器(VCSOs)由于具有诸多优点,在光通信、光互联、光交换等领域得到了广泛的应用^[1].通过借鉴VCSELs的垂直微腔结构特点,一种垂直腔半导体光放大器(VCSOAs)的可行性在1994年率先由C. Tombling等人提出^[2],指出VCSOAs可以显著克服传统半导体边发射光放大器(SOAs)的两个缺点:1)与光纤耦合效率低;2)对光信号偏振很敏感.1995年,A. Karlsson通过分析比较VCSOAs与SOAs的特点,指出VCSOAs更具有适于在光纤通信及阵列光信号处理中应用的前景^[3].VCSOAs还具有工作于低噪声、体积小、成本低等特点,更重要的是它非常适用于集成高密度二维阵列结构中^[4],这使其在波分复用系统、光开关、波长变换器^[5]中有着广泛的应用前景.

近年来,对VCSOAs的研究广泛展开,工作在1.3 μm波长和1.55 μm波长的VCSOAs在实验中已基本实现^[6,7],但尚需对VCSOAs的工作特性作进一步的理论分析.从VCSOAs结构上来说,垂直微腔构造使其腔长较短,以致单程增益很小,需要高反射率的分布布拉格反射堆(DBR)构成的谐振腔来提供高的光反馈.然而,DBR是对一定范围波长和入射角度内的光提供高反馈,这样同时也限制了VCSOAs的增益和带宽,因而如何优化增益和带宽的问题应运而生.本文从VCSOAs器件结构出发,分别在反射模式和透射模式情况下,以DBR反射率、单程增益和有效腔长为控制参量,对VCSOAs的增益和带宽特性进行

了理论分析,并且引入增益-带宽积,对其均衡增益与带宽的作用作了一些理论上的探讨.

1 理论模型

1.1 结构描述

典型的VCSOAs结构如图1所示^[8].有源层为多量子阱(MQW)构成,两侧为具有高反射率、温度特性好的GaAs/AlAs材料DBR.泵浦光由底层注入,透过GaAs衬底对VCSOAs进行光泵浦;输入、输出光信号由光环形器分别导入和导出;反射率分别为 R_1 和 R_0 的DBR反射堆构成反馈谐振腔.VCSOAs工作模式分为透射模式(光信号由底层

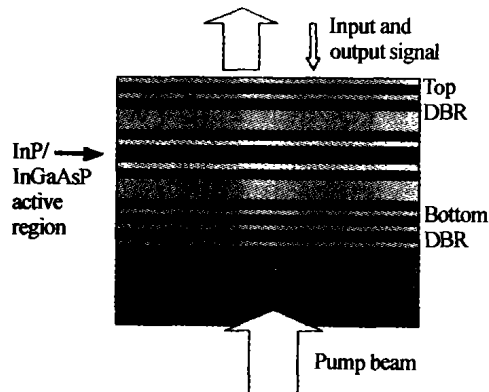


图1 典型VCSOAs结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the VCSOAs device model structure

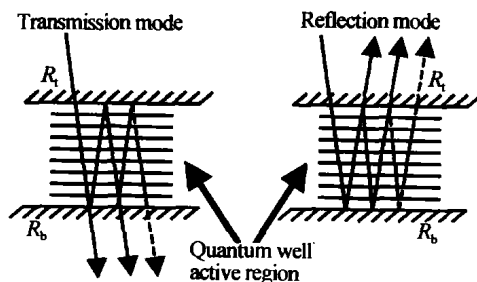


图2 VCSOAs工作在透射模式与反射模式下的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the VCSOAs operation under transmission and reflection modes

*国家自然科学基金(No. 10174057)、宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室开放课题资助(No. 02KF)

Email: zhaozheng1302@sina.com

收稿日期:2003-09-12

DBR 输出)与反射模式(光信号由顶层 DBR 输出), 如图 2 所示.

1.2 理论分析

可以将 VCISOAs 看作多层介质膜结构, 两端考虑为无损耗介质, 折射率分别为 n_a, n_b . 由折射率为 n_a 面入射的场为^[9]

$$E_I = |E_I| e^{ik_I r} \quad (1)$$

式中 $r = (x, y, z)$, k_I 沿 z 轴方向(即垂直入射方向), $|k_I| = 2\pi\lambda/n_a$, λ 是真空中波长. 器件反射与透射场分别为 $E_R = |E_R| e^{ik_R r}$ 和 $E_T = |E_T| e^{ik_T r}$, 对应的传输矢量 $k_R = -(2\pi\lambda/n_a) e_z$, $k_T = (2\pi\lambda/n_b) e_z$. 反射模式和透射模式情况下的增益为

$$G_R = |E_R|^2 / |E_I|^2 \quad (2)$$

$$G_T = (n_b/n_a) |E_T|^2 / |E_I|^2 \quad (3)$$

VCISOAs 增益增长因子为 ξ , 它对应于有源区驻波波峰与有源区 MQW 的对准程度, 驻波波峰与 MQW 对得越准, 所获得的增益也越大. 垂直腔单程增益

$$G_s = \exp[\xi g L_a - \alpha_c L_c] \quad (4)$$

式中 g 为材料增益, L_a 为量子阱厚度, L_c 为有效腔长, 它大于垂直腔几何长度^[3]. α_c 为腔内平均损耗. 由此可引入 F-P 腔光放大器的增益表达式^[10]

$$G_R = \frac{(\sqrt{R_t} - \sqrt{R_b} G_s)^2 + 4 \sqrt{R_t R_b} G_s \sin^2 \phi}{(1 - \sqrt{R_t R_b} G_s)^2 + 4 \sqrt{R_t R_b} G_s \sin^2 \phi} \quad (5)$$

$$G_T = \frac{(1 - R_t)(1 - R_b) G_s}{(1 - \sqrt{R_t R_b} G_s)^2 + 4 \sqrt{R_t R_b} G_s \sin^2 \phi} \quad (6)$$

式中单程失谐相位 $\phi = 2\pi n_c L_c (\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_c})$, 表示了信号光波长 λ 与 λ_c 的偏移程度, 表达式中 n_c 为腔内折射率, 它是腔内所有层的折射率均值. 当 $\phi = 0$ 时, 光波与 F-P 腔形成谐振, 此时获得最大增益.

从物理机制上来说, 由于垂直腔腔长较短, VCISOAs 的增益带宽主要受限于 F-P 腔的线宽. 由式 (1)、(2), 反射模式和透射模式情况下的 3 dB 带宽为

$$\Delta f_R = \frac{c}{\pi n_c L_c} \times \arcsin \{ 4 \sqrt{R_t R_b} G_s [(1 - \sqrt{R_t R_b} G_s)^{-2} - 2(\sqrt{R_t} - \sqrt{R_b} G_s)^{-2}] \}^{-1/2} \quad (7)$$

$$\Delta f_T = \frac{c}{\pi n_c L_c} \times \arcsin \{ (4 \sqrt{R_t R_b} G_s)^{-1} \times (1 - \sqrt{R_t R_b} G_s)^2 \} \quad (8)$$

式中 c 为真空中光速. 实际上, 增益的增大总是伴随着带宽的减小, 不妨定义增益的均方根与带宽的乘积^[11], 来有效地均衡这一矛盾, 称之为增益-带宽积.

$$\sqrt{G_R} \Delta f_R = \frac{c}{2\pi n_c L_c} (\frac{1}{\sqrt{R_t}} - \sqrt{R_t}) \quad (9)$$

$$\sqrt{G_T} \Delta f_T = \frac{c}{2\pi n_c L_c} \sqrt{\frac{(1 - R_t)(1 - R_b)}{\sqrt{R_t R_b}}} \quad (10)$$

值得注意的是, 式 (10) 限于增益大于 3 dB 的情况, 而且式 (9) 所示的反射模式增益-带宽积与底层 DBR 反射率 R_b 无关.

VCISOAs 器件中 DBR 材料对光波的吸收和散射会减小反射率, 其最高反射率只对应于一定范围波长. 在计算中, 由于增益带宽远小于 DBR 反射带宽(约 100 nm), 因此忽略了这种影响, 并且谐振中心波长 λ_c 也近似等于 DBR 反射中心波长. 同时, 光横模在一维模型中, 谐振波长差异很小, 计算中也没有给予考虑.

2 计算结果与分析

根据典型器件结构, 模拟计算参数分别为: $n_c = 3.2, L_c = 2.2 \mu\text{m}, G_s = 1.008$, 中心波长取 1315.1 nm. 图 3 为反射模式($R_t = 0.972, R_b = 0.999$)和透射模式($R_t = 0.990, R_b = 0.989$)情况下的增益频谱图. VCISOAs 的带宽较窄, 反射模式下 3 dB 带宽约为 51 GHz (0.296 nm), 透射模式下 3 dB 带宽为 17 GHz (0.1 nm), 与文献[12]实验基本一致, 并且说明可以通过改变设计参数进一步优化带宽. VCISOAs 的增益带宽主要受 F-P 腔的制约, 这正是 VCISOAs 的基本特点. 对于工作于其它波段的 VCISOAs, 考虑到 DBR 反射中心波长与谐振中心波长近似一致, 理

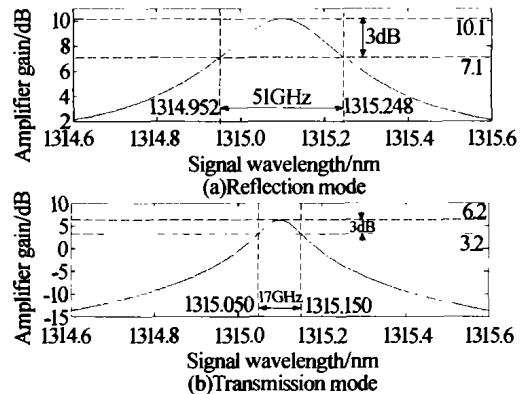


图 3 中心波长 1315.1 nm 的 VCISOAs 增益频谱图
Fig. 3 Gain spectrum for VCISOAs of central wavelength at 1315.1 nm

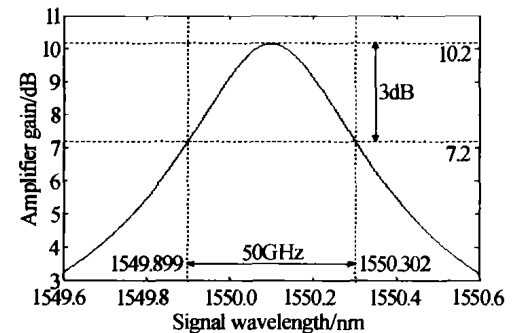


图 4 反射工作模式下, 中心波长 1550.1 nm 的 VCISOAs 的增益频谱图
Fig. 4 Gain spectrum for VCISOAs of central wavelength at 1550.1 nm in reflection mode

论上 VCISOAs 增益带宽特性不会因为波段的变化而产生变动. 经过模拟计算, 工作中心波长为 1550.1 nm, 反射工作模式 VCISOAs 的增益频谱图如图 4, 其最大增益带宽与图 3(a) 基本一致.

图 5(a)、(b) 分别为反射模式情况下最大增益和增益带宽随 R_t 的变化曲线. (a) 图中“*”符号对应的为 VCISOAs 的激射阈值, G_s , R_t 和 R_b 应该满足条件 $G_s^2 R_t R_b \leq 1$, 以避免达到激射阈值. 图中增益随 R_t 的增大而增加, 在 R_t 较小时, 增益的变化相对平缓, 这是由于放大器增益主要是被最大载流子密度所限制. 然而, 谐振腔谐振频率和材料增益频谱会随温度改变, 而且应尽量远离激射阈值, 图中所示的 50 dB 以上的增益实际上是很难得到的. 而且结果表明, 参量 G_s 由 2% 到 4% 变化时, 得到的峰值增益以 10 dB 为步进上升. 同样, 在 (b) 图中可以看出, 要想得到更大的带宽, 就应该减小 R_t ; 在 $R_t \leq 0.91$ 时, 可以获得大于 100 GHz 的带宽. 从 4% 到 2%, G_s 每减小 1%, 带宽便有约 100 GHz 的提高. 由此可知, 增益与带宽的变化趋势正好相反. 因此, 如何同时取得更大的增益和更宽的带宽, 这是一个两难的问题.

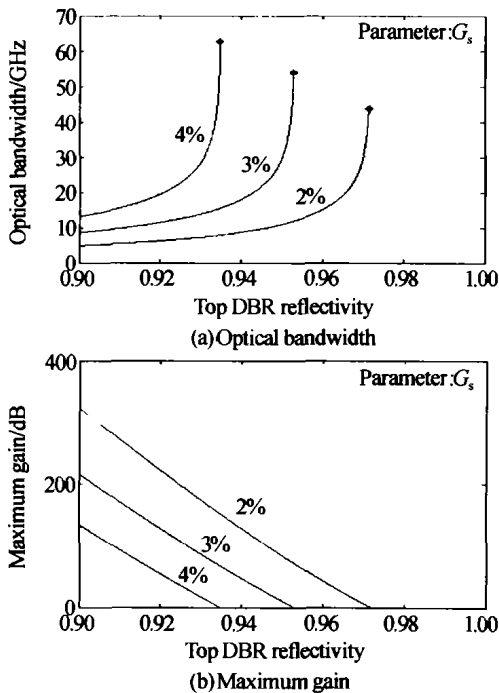


图 5 反射模式下 VCISOAs 最大增益和增益带宽随 R_t 变化的关系曲线. 以 G_s 为参变量

Fig. 5 Maximum amplifier gain and optical bandwidth, as functions of R_t , for reflection type VCISOAs.

The G_s is given as a parameter

为了克服此矛盾, 引入增益-带宽积, 以均衡增益与带宽. 式(9)中, 反射模式情形下的增益-带宽积与 R_b 无关, 随 R_t 变化的关系曲线见图 6. 随着 R_t 的增大, 增益-带宽积不断减小, 在 R_t 趋近于 1 时, 其减小趋势尤为陡峭, 与文献[8]实验结果相吻合.

典型结构 VCISOAs 模型在 $G_t = 10$ dB 时, 增益-带宽积为 510 GHz, 图 6 中远大于 510 GHz 的增益-带宽积是在带宽很大, 但增益非常小的情况下得到, 所以器件的优化中必须要将增益-带宽积与增益、带宽结合起来考虑. 取 L_c 为参变量, VCISOAs 中 L_c 的减小伴随着增益-带宽积增大. 但是实际上 L_c 太小时, 所要求的 DBR 反射率也要越大, 实际应用中, L_c 通常都大于 2 μm .

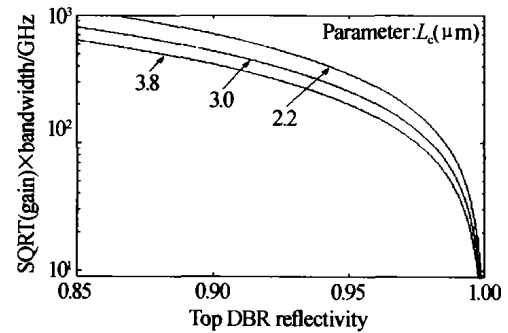


图 6 反射模式 VCISOAs 的增益-带宽积与 R_t 的关系曲线, 以 L_c 为参变量

Fig. 6 Gain-bandwidth product against R_t for reflection mode VCISOAs, The L_c is given as an parameter

与反射模式不同的是, 式(10)的透射模式情形中, R_t 和 R_b 都会对 VCISOAs 的增益-带宽积带来影响. 图 7 为透射模式 VCISOAs 的增益-带宽积随输出镜面反射率而变化的关系曲线. 可见, 两种模式下的增益-带宽积的变化趋势一致. 反射模式曲线(虚线)与透射模式曲线(实线)的交叉处代表的是 $R_t = R_b$ 的对称 VCISOAs. 可以从图 7 中看出 $R_t > R_b$ 时, 透射模式下的增益-带宽积要优于反射模式.

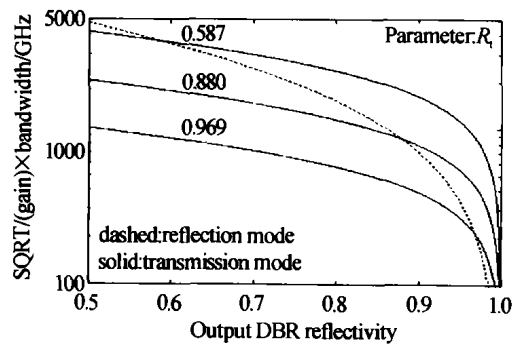


图 7 VCISOAs 增益-带宽积与输出 DBR 反射率关系曲线, 透射模式下以 R_t 为参变量

Fig. 7 Gain-bandwidth product versus DBR reflectivity for reflection mode and transmission mode VCISOAs, respectively. For transmission mode, the R_t is given as an parameter

3 结论

综上所述, 在 VCISOAs 的设计和应用中, 通过增大腔面反射率和单程增益, 可以提高 VCISOAs 的放大增益, 但增益的增大也伴随着带宽的减小. 通过优化设计, 计算结果表明 10 dB 以上增益, 50 GHz 以上带

宽可以实现. 然而, 在器件设计中不能单方面考虑增大单程增益或腔面反射率来增大放大增益, 同时应考虑带宽的要求, 比如窄带宽适用于滤波器^[13], 而波分复用(WDM)系统则要求有宽的带宽. 设计中可以在能满足带宽的前提下, 考虑调整反射率或单程增益这两个参量来获得尽可能大的增益, 可以得到较理想结果. 在协调增益与带宽间的平衡中, 增益-带宽积是一个很有效的参量.

参考文献

- 1 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 垂直腔面发射半导体微腔激光器. 物理学报, 1999, 28(4): 210 ~ 216
Pan W, Zhang X X, Luo B, et al. Phys, 1999, 28(4): 210 ~ 216
- 2 Tombling C, Saitoh T, Mukai T. Performance predictions for vertical-cavity semiconductor laser amplifiers. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(11): 2491 ~ 2499
- 3 Karlsson A, Höijer M. Analysis of a VCLAD: Vertical-cavity laser amplifier detector. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(11): 1336 ~ 1338
- 4 Björilin S, Bowers E. Noise figure of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(1): 61 ~ 66
- 5 张宏斌, 丘昆, 李中桂. 基于半导体光放大器交叉增益调制(SOA-XGM)波长变换器仿真研究. 光子学报, 2002, 31(3): 337 ~ 344
Zhang H B, Qiu K, Li Z G. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 337 ~ 344
- 6 Wiedenmann D, Moeller B, Michalzik R, et al. Performance characteristics of vertical-cavity semiconductor laser amplifiers. Electron Lett, 1996, 32(4): 342 ~ 343
- 7 Lewen R, Streubel K, Karlsson A, et al. Experimental demonstration of a multifunctional long-wavelength vertical-cavity laser amplifier-detector. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(8): 1067 ~ 1096
- 8 Karim A, Björilin S, Piprek J, et al. Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers. IEEE J Select Topics Quantum Electron, 2000, 6(6): 1244 ~ 1253
- 9 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论. 北京: 电子工业出版社, 2001. 304 ~ 379
Zhang K Q, Li D J. Electromagnetic theory for microwaves and optoelectronics. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 304 ~ 379
- 10 Mahony O. Semiconductor laser optical amplifier for use in future fiber systems. IEEE J Lightwave Technol, 1988, 6(4): 531 ~ 544
- 11 Lü H C, Luo B, Pan W, et al. Tunable output power varying with the splitting ratio of a coupler from a fiber ring semiconductor laser. Applied Optics, 1999, 38(9): 1764 ~ 1766
- 12 Calvez S, Clark H, Hopkins M, et al. 1.3 GaInNAs optically-pumped vertical cavity semiconductor optical amplifier. Electronics Letters, 2003, 39(1): 100 ~ 102
- 13 欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器. 光子学报, 2002, 31(3): 281 ~ 284
Ouyang Z B, Liu H S, Li J Z. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 281 ~ 284

Theoretical Analyses of Semiconductor Optical Amplifiers Based on Vertical-cavity Resonator

Zhao Zheng^{1,2,3}, Pan Wei^{1,2}, Luo Bin¹, Deng Guo^{1,2}, Li Xiaofeng^{1,2}

1 Dept. of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

2 National Key Laboratory of Broad-band Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054

3 College of Natural Sciences, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

Received date: 2003-09-12

Abstract Based on new vertical-cavity semiconductor optical amplifiers device structure, optical gain and bandwidth is calculated respectively in reflection and transmission mode due to the varieties of DBR reflectivity and single pass gain, showing that higher DBR reflectivity yields higher gain, while the increase of gain is with the decrease of optical bandwidth. In order to configure gain and optical bandwidth appropriately, a concept of the gain-bandwidth product is introduced. The result shows that the gain above 10dB, optical bandwidth above 50 GHz can be achieved. The calculated results agree with the experimental results reported in document. These results may be helpful for optimizing the structure design and the factors in the application of VCISOAs.

Keywords Vertical-cavity semiconductor optical amplifiers; Amplifier gain; Optical bandwidth

Zhao Zheng was born on Oct. 27, 1979, in Chengdu, Sichuan. He received bachelor degree in Optoelectronics Department of Sichuan University. He is currently studying at the Computers and Communications Engineering College of Southwest Jiaotong University as a M. S. candidate. His major research fields include semiconductor lasers and semiconductor optical amplifiers.

