

文章编号: 1001-3806(2006)01-0060-04

基于耦合腔的 VC SOA s 增益带宽优化

许江衡, 罗斌*, 潘伟, 贾习坤, 汪帆

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 垂直腔半导体光放大器 (VC SOA s) 的带宽通常较窄, 通过改变其有源区一侧的 DBR 膜堆结构, 构造无源腔与原有源腔相耦合的耦合腔结构可优化 VC SOA s 带宽。基于该结构模型, 在反射工作模式下, 利用传输矩阵方法对双腔和三腔结构的 VC SOA s 的增益带宽特性进行了分析。结果表明, 在 10dB 的峰值增益水平下, 带宽扩展至 3nm 以上, 较单腔结构有了很大的提高, 具有一定的现实参考意义。

关键词: 光通信; 垂直腔半导体光放大器; 传输矩阵; 增益; 带宽

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Optimal design of the gain bandwidth of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on the couple cavities

XU Jiang-heng, LUO Bin, PAN Wei, JIA Xikun, WANG Fan

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

Abstract The bandwidth of the vertical cavity semiconductor optical amplifiers (VC SOA s) is commonly narrow. A VC SOA s using a coupled cavity design to broaden the bandwidth is proposed. The coupled cavity is made by changing the structure of the distributed Bragg reflector (DBR) on one side of the active region to construct the passive cavity coupled with the active region. Based on this model and under the reflection mode the characters of the gain bandwidth of the two cavities and three cavities structure are calculated with the transfer matrix method. It is found that the bandwidth is increased to above 3nm at the 10dB peak gain level. It has a great improvement compared to simple cavity structure.

Key words optical communication; VC SOA s; transfer matrix; gain; bandwidth

引 言

随着垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs) 技术及其制造工艺的日益成熟, VC SOA s 也受到了人们的广泛关注。研究分析表明, VC SOA s 克服了传统 (边发射) 半导体光放大器 (SOA s) 的对光纤耦合效率低和对偏振较敏感等缺点, 并且具有低噪声、低制造成本等优点, 其在波长转换、光开关、光转发器等方面有着广泛的应用前景^[1-3]。

VC SOA s 的带宽主要受限于其 F-P 腔结构的线宽, 根据目前文献报道^[4-6], 1.31 μ m VC SOA s 的一组典型水平参数值为: 500GHz 的带宽, 峰值增益 10dB。曾经有人对 980nm 的 VC SOA s 提出过一种基于多有源区的耦合腔结构, 用以优化 VC SOA s 的增益带宽^[7]。该结构采用三有源区相耦合, 根据理论计算, 可将带宽

扩展至 4.6nm, 峰值增益为 4dB。

基于上述结构考虑, 针对 1.31 μ m 的 VC SOA s 提出了另外一种耦合腔结构, 通过改变有源区一侧的分布布拉格反射镜 (DBR) 膜堆结构, 构造无源腔与原有源腔相耦合。经过理论计算分析, 可以将带宽扩展至 3nm 以上, 峰值增益约为 10dB。需要说明的是, 此时的单程增益 $G_s = 1.03$ 而在文献 [1] 中单腔结构的 $G_s = 1.07$ 。如果增大单程增益, 降低有源区一侧的反射率, 可以将带宽水平进一步提高, 达到 7nm 以上。并且得到的增益曲线的形状也比较接近于理想的矩形。

在目前对 VC SOA s 的研究中, 主要是利用光学传输矩阵或非涅耳公式分析 DBR 的反射特性^[8,9], 对于整个 VC SOA s 则采用 F-P 腔的模型对其增益特性进行分析。本文中基于 VC SOA s 的有源区由不同材料的势垒和量子阱分层结构组成考虑, 将有源区看作多层介质薄膜结构, 采用与处理 DBR 膜层类似的方法, 通过对有源区各膜层进行分析, 建立其对应的特征矩阵, 然后将有源区 DBR 一起考虑, 建立并应用传输矩阵对 VC SOA s 的增益特性进行研究和分析。

1 理论模型

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

作者简介: 许江衡 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事光通信与光放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hck@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2004-12-03; 收到修改稿日期: 2005-03-01

1.1 垂直腔半导体光放大器结构

本文中的结构分析是基于文献 [4] 中的结构进行的。两个 1.31 μm AlAs/GaAs 分布布拉格反射镜, 其底层和顶层分别为 25 个和 13 个周期数, 以 InP 为基底的有源区实际长度约为 1 μm, 其光学长度等于 2.5 倍内部信号波长, 有源区包含 3 个量子阱, 每个量子阱堆有 7 个压缩 InAs_{0.5}P_{0.5} 量子阱和 In_{0.5}Ga_{0.2}P 应变补偿势垒, 抽运从 GaAs 底层注入, 输入信号在顶层 DBR 耦合入 VCSOA_s 并且输出。3 个量子阱堆都被设计生长在驻波的峰值上, 以使 VCSOA_s 增益理论上达到峰值^[4]。

1.2 传输矩阵的建立

根据薄膜光学的理论, 可以建立有源区以及各 DBR 反射膜层的特征矩阵, 在正入射的情况下的一般公式为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{i}{n_j} \sin\delta \\ i n_j \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\delta = k_0 n_j d_j$ 为膜层的位相厚度, k_0 ($k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$) 为真空电磁波波矢, n_j 为所计算膜层的折射系数 (实数或复数), d_j 为膜层实际生长厚度。

根据本文中的研究思路, 需要建立的特征矩阵一共有 6 个。包括顶层与底层的两个 DBR 高反射层的特征矩阵, 两个有源区的过渡介质层的特征矩阵, 以及有源区量子阱与势垒的特征矩阵。

有源区的 n_j 在激励条件下, 一般表达式为:

$$\tilde{n} = (n + bN) + i(-g + \alpha)/2k_0 \quad (2)$$

式中, b 表示的是有效折射率受载流子浓度变化的影响, 在 N 变化不大的情况下, 可以认为 b 为常数, 其数值一般较小, 在本文中忽略了它的影响, N 为注入载流子浓度。衰减系数 α 与介质材料和入射波长有关。一般对于量子阱来说, 其增益系数 g 与量子阱处的载流子密度、信号光波长、温度以及光子密度多种因素有关, 假设在中心波长处, 室温条件下, g 可以近似的表示为^[4]:

$$g(N) = g_0 \ln \left[\frac{N + N_s}{N_{tr} + N_s} \right] \quad (3)$$

式中, N_{tr} 为透明载流子浓度, 增益系数微分 g_0 和 N_s 为固定参数, 此处中心波长取在 1.31 μm 处, 上述 3 个参数可分别取为^[11]: $g_0 = 1580 \text{ cm}^{-1}$, $N_{tr} = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_s = -0.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

对于有源区的势垒层, 其产生的增益为 0 它的 n_j 表达式为:

$$\tilde{n} = n - i\alpha/2k_0 \quad (4)$$

对于 DBR 和过渡区, \tilde{n} 为介质材料折射率, 忽略各膜层的材料损耗。

根据上述参数, 可以依次建立各膜层特征矩阵, 整个 VCSOA_s 的传输矩阵为按结构顺序各特征矩阵相乘

的积。

整个膜系的特征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{n_j} \sin\delta_j \\ i n_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, η_{k+1} 为衬底材料的自由导纳, 在正入射的情况下, 大小与其光学导纳相同, 而在数值上可以用介质的复折射率表示它的光学导纳。

反射模式下的增益可以表示为:

$$G_r = \left(\frac{B - C}{B + C} \right) \left(\frac{B - C}{B + C} \right)^* \quad (6)$$

2 分析与计算

上面的理论模型是依据文献 [1] 中的 VCSOA_s 结构建立的。其微腔结构的形式是用高折射率层 (H 层) 与有源区相邻, 再接以低折射率层 (L 层) 组成一个 HL 周期, 两侧分别连接 M_1 和 M_2 个周期, 最后再接一个 H 层结束, 形成 (HL) (HL) ... (HL) H 结构, 这种结构简称为 HLH 结构^[10]。因此, 整个器件的单腔结构为:

$$H \underbrace{(HL) (HL) \dots (HL)}_{M_1} \text{有源区} \underbrace{(HL) (HL) \dots (HL)}_{M_2} H \quad (7)$$

式中, AlAs/GaAs 材料 DBR_s 的介质高低折射率分别为 3.45 2.89 有源区基层 3.17, InAs_{0.5}P_{0.5} 量子阱和 In_{0.5}Ga_{0.2}P 势垒, 折射率分别为 3.36 3.30 有源区两对对称的基层的厚度分别为 0.1055 μm, 0.35572 μm^[4]。

根据文献 [1] 中的参数所得到的单腔结构的 VCSOA_s 其在反射工作模式下的增益特性曲线如图 1 所示。在下面得到的几种结构中, 在注入载流子浓度 $N = 1.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 通过调整有源区两侧的 DBR 膜堆的结构, 将峰值增益均控制在 10dB 左右以方便比较。

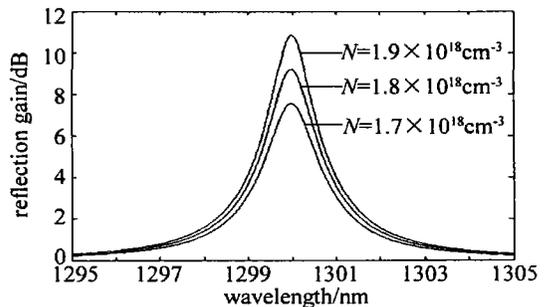


Fig 1 The reflection gain of the simple cavity VCSOA_s at 1.31 μm

在上述结构的基础上, 提出了一种新的耦合腔结构, 用以来优化 VCSOA_s 的带宽。此结构是通过改变有源区一侧的 DBR 膜堆结构, 构造无源腔与原来的有源腔相耦合。其双腔结构可以表示为:

$$H \underbrace{(LH) \dots (LH)}_{M_1'} (LL) H \underbrace{(LH) \dots (LH)}_{M_2'} \text{有源区} \underbrace{(HL) (HL) \dots (HL)}_{M_3'} H \quad (8)$$

中间的两个 L 层是间隔层, 它与其两侧的 DBR 膜堆形成了一个无源腔。有源区与其两侧的 DBR 膜堆形成了一个有源腔, 并与前面的无源腔相耦合形成耦合腔。在双腔结构中一共有 3 个 DBR 反射膜堆, 其周期数分别为 M_1', M_2', M_3' 。

应用传输矩阵法对双腔结构进行分析。对双腔结构而言, 只需要在单腔结构的基础上加上一个 DBR 反射膜堆和一个间隔层的特征矩阵。当 $M_1' = 6, M_2' = 16, M_3' = 15$ 时, 得到的双腔结构在反射模式下的增益特性曲线如图 2 所示。

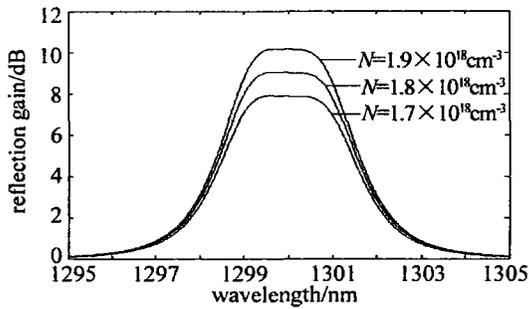


Fig 2 The reflection gain of the two cavities VCISOAs at 1.31μm

从图 2 中可以看出, 双腔结构在相同的增益水平下, 较单腔结构而言, 带宽有了很大程度的提高, 并且其增益曲线的形状也比较接近于理想的矩形。

$$H \underbrace{(LH) \dots (LH)}_{M_1''} (LL) H \underbrace{(LH) \dots (LH)}_{M_2''} (LL) H \underbrace{(LH) \dots (LH)}_{M_3''} \text{有源区} \underbrace{(HL) (HL) \dots (HL)}_{M_4''} H \quad (9)$$

结构与双腔结构类似, 在三腔结构中一共有 4 个 DBR 反射膜, 其周期数分别为 $M_1'', M_2'', M_3'', M_4''$ 。

三腔结构的分析过程也与双腔结构类似。当 $M_1'' = 2, M_2'' = 13, M_3'' = 16, M_4'' = 17$ 时, 其在反射模式下的增益特性曲线如图 4 所示。此时的增益水平也在 10dB 左右, 可以看出, 三腔结构有与双腔结构近乎相同的带宽性能, 只是略好一些, 但得到的增益曲线的更加接近于理想的矩形。

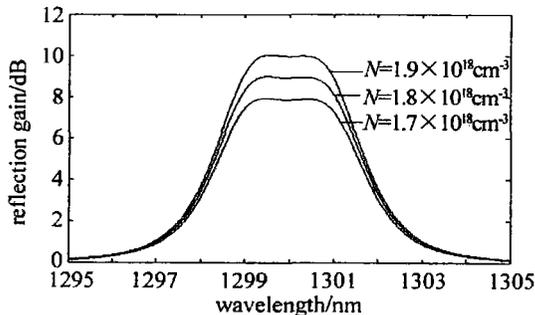


Fig 4 The reflection gain of the three cavities VCISOAs at 1.31μm

这里所形成的耦合腔, 从薄膜光学的角度其实可以看成是一个单半波滤光片, 其基本结构是反射膜 | 间隔层 | 反射膜。为了得到较平坦的增益特性, 可以通过

而图 3 反映了 DBR 反射膜堆周期数 M_1', M_2' 的大小对双腔结构的增益带宽特性的影响, 其中 $M_3' = 15$ 载流子浓度 $N = 1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 始终保持不变。

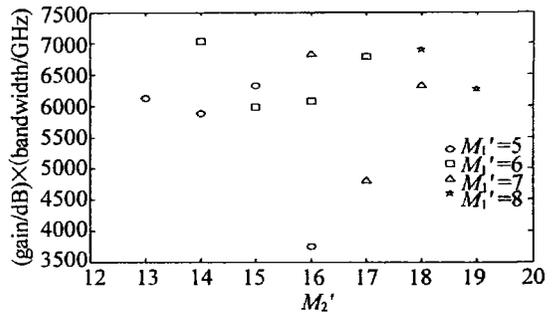


Fig 3 The gain times the bandwidth product of the two cavities varies with M_1' and M_2'

当 $M_1' = 5$ 时, 如果 $M_2' < 13$ 则得到的双腔结构的增益特性曲线的平坦度很低, 失去了实际意义; 如果 $M_2' > 16$ 此时, 双腔结构的阈值载流子浓度将低于所给定的载流子浓度, 从而产生激励。同样, 当 M_1' 为 6, 7, 8 时, M_2' 的大小也需要满足一定的要求, 以防止特性过坏和激励的产生。总的说来, 要得到合适的增益带宽特性, M_1' 与 M_2' 之间需要满足一定的要求。

相应三腔结构的具体构成是:

调节间隔层两侧的反射膜结构, 调整增益的平坦度。

在两种结构的调整过程中发现, 几个反射膜的周期数对增益曲线的影响不尽相同。其中 M_3' 和 M_4'' 的作用类似, 数值越高, 峰值增益越高, 带宽也越宽, 但当其数值超过一定值时, 对增益特性几乎没有影响, 这是因为此时在有源区这一侧的反射率已经足够高。剩下的 M_1', M_2' 之间以及 M_1'', M_2'', M_3'' 之间在调整过程中需要相互间满足一定的反射率要求, 通过改变多腔之间的耦合程度来影响增益和带宽特性。

通过调整耦合腔结构可以改善增益带宽特性, 可以认为是由于多半波滤光片对透射波长的选择特性。由于间隔层两侧的反射率的差异, 导致滤光片的透射率曲线是一个有陡峭边缘并包含两个紧靠在一起的透射峰的通带, 在两峰之间只有一个浅下凹, 这与得到的增益特性曲线的形状十分吻合。

图 5 是 3 种结构的峰值增益随工作条件 (注入载流子浓度) 改变的变化情况。

由图 5 中可以看出, 单腔结构受工作条件的影响较双腔和三腔结构要大。这也可以说明, 耦合腔结构下的 VCISOAs 增益特性要更加稳定。

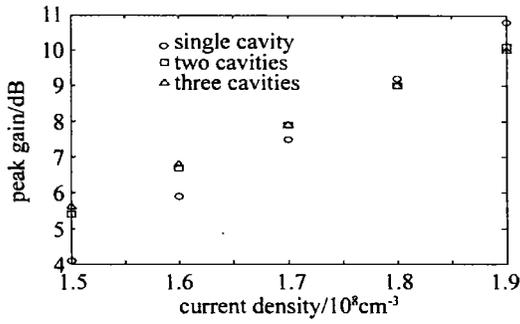


Fig 5 The peak gain of the three kinds of the structure at different work conditions

因为带宽通常随着峰值增益的增加而被压缩, 所以要客观地比较带宽不太容易, 一般是来比较它们的增益带宽积。图 6 是在相同工作条件下 (相同注入载流子浓度) 单腔、双腔和三腔的峰值增益带宽积的对比情况。

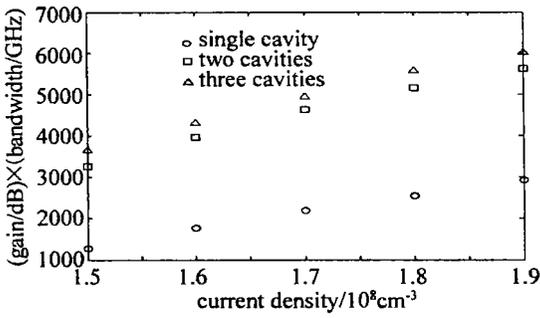


Fig 6 The comparison of the gain times the bandwidth product in different conditions of the three structures

3 种结构所对应的参数和前面相同。由图 6 可知, 耦合腔结构的带宽较之单腔结构有了明显的改善。其中双腔和三腔结构的带宽特性比较接近。

另外必须提到的是, 单程增益 G_s 在 VC SOAs 带宽特性比较中是一个很重要的参数, 其对 VC SOAs 的带宽特性影响很大。在上述两种耦合腔结构中, 在注入载流子浓度 $N = 1.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 单程增益 $G_s = 1.03$ 数值较小, 如果提高注入载流子浓度至 $N = 3.83 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 单程增益 G_s 将提高到 $G_s = 1.07$, 和

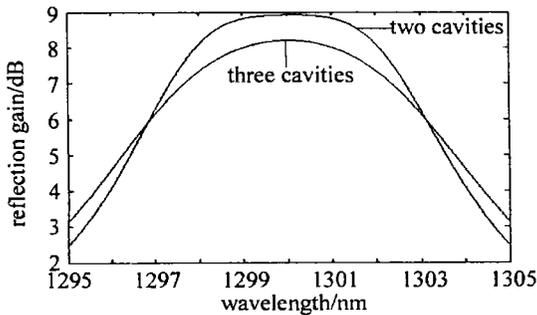


Fig 7 The bandwidth characters of the coupled cavities when $G_s = 1.07$

文献 [4] 中的水平相当。此时, 如图 7 所示, 在 8 dB 以上的增益水平下, 可以将带宽进一步扩展到 7 nm 以上, 增益带宽积可以达到 11000 (dB × GHz) 以上, 较文献 [1] 中 3 nm 的带宽水平有了很大提高。与此同时, 降低了有源区一侧的反射率, 此时的 $M_1' = 4$, $M_2' = 12$, $M_3' = 17$, $M_1'' = 2$, $M_2'' = 11$, $M_3'' = 12$, $M_4'' = 17$ 。

3 结 论

通过改变 VC SOAs 有源区一侧的 DBR 膜堆结构构造无源腔, 与原有源腔相耦合, 利用传输矩阵法对该耦合腔模型的反射增益特性进行了理论研究分析, 发现耦合腔结构有效地扩展了带宽, 并且在一定程度上优化了增益曲线的形状。从制造工艺方面来说, 双腔结构和单腔结构相比, 没有增加太多的复杂程度, 而性能较单腔结构而言有了明显的提高, 相对于三腔结构, 结构上要简单一些, 而在性能上相差无几。双腔结构的 VC SOAs 在实际应用中具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] DURHUUS T. A 1.5- μm optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6): 942~954
- [2] DENG G, PAN W, LUO B *et al*. Theoretical analysis of the loop with control of bistability in VC SOA [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 74~76 (in Chinese).
- [3] LIX F, PAN W, LUO B *et al*. Study on multimode relaxation oscillation of VCSELs and EELs [J]. Laser Technology, 2004, 28(3): 248~250 (in Chinese).
- [4] PIPEK J, BJÖRLIN S, BOWERS J E. Design and analysis of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(1): 127~134
- [5] BJÖRLIN S, RDU B, ABRAHAM P *et al*. Long wavelength vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(2): 274~281
- [6] WIEDENMANN D, MOELLER B, MICHALZIK R *et al*. Performance characteristics of vertical cavity semiconductor laser amplifiers [J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 342~343
- [7] LIM S F, CHANG-HASNAN C J A. A proposal of broadband vertical cavity laser amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(11): 1240~1242
- [8] YAN J X, WEI G H. Matrix optics [M]. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 1995. 213~216 (in Chinese).
- [9] ROYO P, KODA R, COLDREN L A. Vertical cavity semiconductor optical amplifiers: comparison of Fabry-Perot and rate equation approaches [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(3): 279~284
- [10] GUO Ch Zh, CHEN Sh L. On microcavity effect in vertical cavity surface emitting quantum well laser with multilayer heterostructure reflectors [J]. Acta Physica Sinica, 1997, 46(9): 1731~1743 (in Chinese).