

文章编号: 1001-3806(2007)06-0630-04

## 传输矩阵法研究 MEMS 可调谐垂直腔半导体光放大器

王 欣, 罗 斌\*, 潘 炜, 李建平

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要:** 为了研究微机电可调谐垂直腔半导体光放大器在反射模式下的增益及波长调谐特性, 不同于以往的耦合腔方法, 采用传输矩阵法进行了研究。该方法避免了对有效腔长及增益增强因子的计算过程, 所得结果直接与器件的物理结构相对应。得到了空腔长度、有源区量子阱堆位置的改变对增益及峰值波长的影响。结果表明, 利用该方法模拟计算的结果与实验的结果相吻合。

**关键词:** 光学器件; 垂直腔半导体光放大器; 增益; 波长调谐; 传输矩阵

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Research of MEMS-based tunable vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on transfer matrix

WANG Xin, LUO Bin, PAN Wei, LI Jianping

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

**Abstract** In order to study the gain and wavelength tunable property of MEMS-based tunable vertical cavity semiconductor optical amplifiers at reflection mode, transfer matrix method was used. Unlike the previous coupling cavity method, the transfer matrix method avoids calculating the effective cavity length and gain enhancement factor and its calculated result is corresponded directly with the physical structure of the device. The change of the gain and peak wavelength depending on the shift of empty cavity length and the variation of position of the quantum well stacks were obtained and the calculation result was agreement with the experiment.

**Key words** optical device; vertical cavity semiconductor optical amplifiers; gain; wavelength tunable; transfer matrix

### 引 言

近年来, 垂直腔半导体光放大器 (vertical-cavity semiconductor optical amplifiers, VC SOAs) 引起人们广泛关注。它克服了传统边发射半导体光放大器与光纤耦合效率低、对偏振较敏感等缺点<sup>[1]</sup>, 且具有低噪声、体积小、成本低等优点, 非常适用于集成高密度二维阵列结构<sup>[2]</sup>。

目前, 1.3 $\mu$ m 波长和 1.55 $\mu$ m 波长的 VC SOAs 已在实验室研制成功<sup>[1]</sup>。然而, 不可调谐的 VC SOAs 增益带宽较窄。因此产生了可调谐 VC SOAs。目前一般是采用微机电可调谐系统 (micro-electromechanical system, MEMS) 来实现波长的调谐<sup>[3,4]</sup>。MEMS 可调谐 VC SOAs (MEMS-tunable VC SOAs, MT-VC SOAs) 率先由 COLE 小组于 2004 年在实验室中获得<sup>[3]</sup>, 该小组随后

又提出了第 2 代<sup>[4]</sup>和第 3 代<sup>[5]</sup>的 MT-VC SOAs, 使得器件的波长调谐范围达到 20nm 以上。

COLE 小组在理论上主要采用耦合腔的方法来进行研究, 这种方法涉及到有效腔长及增益增强因子  $\zeta$  的计算<sup>[6]</sup>, 过程很复杂。由于有效腔长及增益增强因子均与波长有关系, 而在可调谐 VC SOAs 里, 波长是变化的, 因而这两项也很难确定, 为了简化计算的过程, 在调谐范围不是很大的情况下, 一般把这两项当成定值来计算<sup>[4]</sup>。不同于耦合腔的方法, 本文中采用了传输矩阵的方法, 将有源区看作多层介质薄膜结构, 采用与处理分布布喇格反射镜 (distribution Bragg reflector, DBR) 膜层类似的方法, 对有源区各膜层进行分析, 建立其对应的特征矩阵, 进而建立整个 MT-VC SOAs 的传输矩阵模型, 并采用此模型对 MT-VC SOAs 的增益及波长调谐特性进行研究。优点是, 结果直接与器件的物理结构相对应, 当 MT-VC SOAs 材料或结构参数值改变时, 直接将变化了的参数带入特征矩阵计算, 就可得到与 MT-VC SOAs 实际结构相一致的结果。

### 1 理论模型

**作者简介:** 王 欣 (1981-), 女, 硕士研究生, 从事半导体激光器与光放大器方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: bku@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-26 收到修改稿日期: 2007-03-15

### 1.1 MEMS 可调谐 VC SOAs 的基本结构

图 1 为 MT-VC SOAs 结构示意图<sup>[3,4]</sup>, 整个腔体由两个 DBR 膜层、DBR 膜层之间的可变的空腔和有源区以及 GaAs 基底组成, DBR 由  $\lambda/4$  光学厚度的 GaAs 和 Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 介质交替生成, 其顶部和底部分别为 5 个和 30 个膜层周期数, 以 InP 为基层的有源区由 3 个量子阱组成, 每个阱有 5 个压应变 InGaAs 量子阱和 AlGaAs 应变补偿势垒, 顶层 DBR 和有源区之间有一光学长度为  $5\lambda/4$  的空腔, 用来实现波长的调节, 本文中将空腔看作顶层 DBR 的一个低反射率层进行计算。抽运光从 GaAs 基底注入, 输入信号光在顶层 DBR 耦合入 MT-VC SOAs 并且从顶层输出。量子阱分布与驻波波峰周期性地对应, 以使 MT-VC SOAs 增益最大, 如图 1b 所示。

MT-VC SOAs 中, 通过改变空腔长度来实现波长的调谐, 空腔长度的增加 (减小) 导致有效腔长的增加 (减小), 进而导致谐振波长的红移 (蓝移)<sup>[4]</sup>, 而空腔长度的改变依赖于激励源的设置。

本文中模型中采用的是集成静电激励源, 忽略边缘场的作用, 空腔的顶层有 1 个固定的中心板和 4 个可弯曲的弹性引脚组成, 空腔的调节偏压加在图 1a 中所示的 tuning contacts 处。加上电压时, 4 引脚由于电极间的作用力而向空腔底层弯曲, 引起空腔长度的改变。

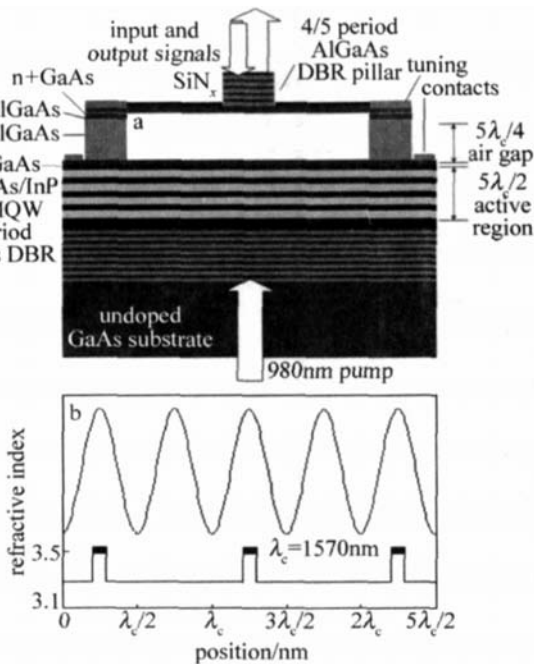


Fig 1 The entire structure/schematic a- quantum well stacks b-MT-VC SOAs

### 1.2 传输矩阵的建立

根据薄膜光学原理, 建立有源区及 DBR 各膜层的特征矩阵, 在正入射情况下, 第  $j$  层膜的特征矩阵  $M_j$  为<sup>[6]</sup>:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \xi_j & \frac{i}{\tilde{n}_j} \sin \xi_j \\ i \tilde{n}_j \sin \xi_j & \cos \xi_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\xi_j = k_0 \tilde{n}_j d_j$ ,  $\tilde{n}_j$  为膜层复折射率,  $d_j$  为膜层厚度,  $k_0$  为真空光波矢,  $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ ,  $\omega$  为入射光波的频率,  $c$  为真空中的光速,  $\lambda$  为真空中入射光波长。

对 MT-VC SOAs 有源区而言, 由于载流子注入产生的激励效应, 使介质的复折射率的实部和虚部随载流子浓度  $N$  而发生变化<sup>[7]</sup>。当载流子浓度变化不大时, 复折射率实部的变化  $\Delta n$  与载流子浓度近似成正比<sup>[8]</sup>:

$$\Delta n = bN \quad (2)$$

式中,  $b$  代表有效折射率随载流子浓度  $N$  变化时的比例系数。折射率的虚部变化和增益 (或损耗) 有关<sup>[7]</sup>, 可以得到激励效应下有源区  $n$  的一般表达式:

$$\tilde{n} = (n + \Delta n) + i(-g + \alpha)/2k_0 = (n + bN) + i(-g + \alpha)/2k_0 \quad (3)$$

根据介质材料折射率和膜层厚度的不同, 需要建立的特征矩阵包括高低折射率不同的介质交替生成 DBR 膜层的特征矩阵, 两个膜层厚度不同的有源区基层特征矩阵, 以及有源区量子阱层和势垒层的特征矩阵。建立各膜层的特征矩阵, 首先确定特征矩阵中的复折射率  $n$ , 对于有源区的量子阱层, 根据文献 [4] 中增益系数公式:

$$g(N) = g_0 \ln \left( \frac{N + N_s}{N_{tr} + N} \right) \quad (4)$$

考虑增益与波长的关系式:

$$g(\lambda) = \frac{g(N)}{1 + (\lambda - \lambda_0/a)^2} \quad (5)$$

结合 (3) 式、(4) 式、(5) 式, 可以得到特定载流子浓度  $N$  下的有源区量子阱层复折射率  $n$ 。(4) 式中,  $N_{tr}$  为透明载流子浓度,  $g_0$  与  $N_s$  分别为增益拟合参量和载流子拟合参量。(5) 式中,  $\lambda_0$  为中心波长,  $a$  为一常数, 取值一般在 20nm ~ 30nm 之间。对于量子阱层, 本文中暂不考虑有效折射率随载流子浓度  $N$  的变化, 即  $\Delta n = 0$  对于势垒层复折射率  $n$ , (3) 式中增益为 0 虚部反映的是它的材料损耗。对于 DBR、空腔和过渡区, 均忽略材料损耗,  $n$  为介质材料折射率。

由上分析, 可得到 DBR 和有源区各膜层特征矩阵  $M_j$ , 按光信号输入时单程所经膜层顺序, 依次将各特征矩阵相乘, 进一步可以得到整个膜系的特征矩阵<sup>[6]</sup>:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^m M_j \begin{bmatrix} 1 \\ n_{m+1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $m$  为 DBR 和有源区总的膜层个数,  $n_{m+1}$  为基底的折射率, 由此可得到 MT-VC SOAs 工作在反射模式下的增益  $G_r$ :

$$G_r = \left[ \frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right] \left[ \frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right]^* \quad (7)$$

式中,  $n_0$  为入射介质折射率, 在此处, 光波入射介质为空气,  $n_0 = 1_0$ .

## 2 计算结果与分析

这里采用文献 [ 4 ] 中报道的 MT-VCSOAs 器件结构和参数作为研究的依据。DBR 膜层中, GaAs 和 Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As 的折射率分别为 2.89 和 3.45。采用 HLH 结构, 有源区的光学厚度为  $5\lambda_c/2$ 。有源区基层介质 InP 的材料折射率为 3.17。量子阱 InGaAs 和势垒 AlGaAs 在无抽运时的折射率分别为 3.6 和 3.45。GaAs 基底的折射率为 3.45。每个量子阱和势垒的厚度分别为 5.5nm 和 9nm, 有源区靠近 DBR 膜层的基层的厚度为 79.24nm, 有源区量子阱堆之间的基层的厚度为 406.12nm, 有源区量子阱和势垒层的内部损耗系数  $\alpha = 15\text{cm}^{-1}$ , 增益拟和参量  $g_0 = 1580\text{cm}^{-1}$ , 透明载流子浓度  $N_{tr} = 1.1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 载流子拟和参量  $N_s = -0.63 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ , 空腔的长度为  $5\lambda_c/4$ 。中心波长  $\lambda_c = 1570\text{nm}$ 。

本文中重点考察小信号输入情况下的 MT-VCSOAs 增益调节特性。根据 (6) 式, 可以得到光纤到光纤的增益与入射波长的关系。

图 2 画出了  $N = 1.22 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$  时, 不同空腔长度时光纤到光纤的增益与波长的关系。图中 1~6 对

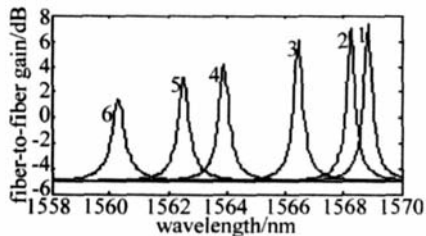


Fig 2 The relationship between fiber-to-fiber gain and wavelength at different air-gap length

应的空腔长度分别比初始的空腔长度减少 20nm, 30nm, 60nm, 100nm, 120nm 及 150nm。由图可以看出, 随着空腔长度的减小, 谐振波长出现蓝移, 峰值增益也开始逐渐下降, 3dB 带宽逐渐增加。主要是由于空腔长度的减小使得信号光在有源区内的相位发生变化, 进而导致量子阱堆偏移了驻波波峰的位置所造成。由图还可得出, 空腔长度减少 130nm, 峰值增益向短波长方向移动 8.7nm, 3dB 带宽增加 0.1nm。

图 3a 中画出了顶层 DBRs 周期数为 5 时, 不同载流子浓度  $N$  下的极值增益曲线。图 3b 为不同顶层 DBRs 周期数  $n_{top}$  下的极值增益曲线。由图 3a 中可以看出, 载流子浓度越大, 光纤到光纤的增益越大, 而 3dB 带宽却越来越小。图 3b 显示出, 顶层的 DBRs 膜

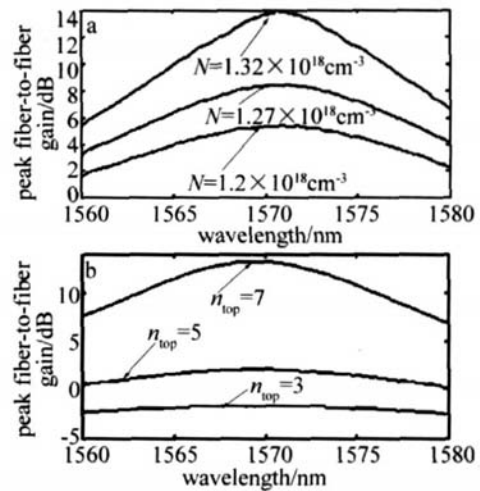


Fig 3 The relationship between peak fiber-to-fiber gain and wavelength a— different carrier density b— different layers number of top DBRs

层周期数  $n_{top}$  越大, 极值增益越大, 3dB 带宽越小。

图 4a 为增益达到极值时所对应的波长 (即谐振波长) 与空腔长度的改变量之间的关系, 图 4b 为文献

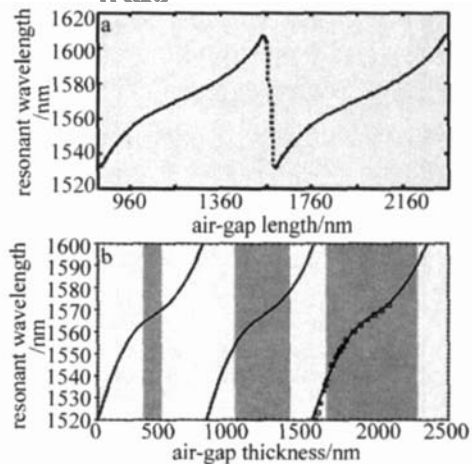


Fig 4 Resonant wavelength as function as air-gap length

a— simulation result b— simulation and experiment result of reference [ 4 ] [ 4 ] 中的仿真及实验结果 (实线为仿真结果, 空心点为实验的结果)。图 4a 中, 空腔初始长度为  $5\lambda/4$  时的调谐范围达到 55.8nm (1538.2nm ~ 1594nm), 而图 4b 中的调谐范围达到 53.1nm (1539nm ~ 1592.1nm), 由两图的对比可以看出, 用传输矩阵方法得出的结论与实验结果相吻合, 证明了该方法的可行性。文献 [ 4 ] 中采用耦合腔的方法, 为了简化计算过程, 一般将有效腔长及增益增强因子  $\zeta$  当成定值来计算, 而本文中考虑了这两项的影响, 因而模拟仿真的结果与文献 [ 4 ] 中略有不同, 与试验结果更为吻合 (由图 4b 中空心点的调谐范围比实线的调谐范围略大些可以得出)。

由图 4a 可知, 空腔长度减小到 367nm ~ 403nm 之间时 (图中用虚线来表示的那一段), 任何信号光都不能被放大。由于空腔长度接近  $\lambda_c/4$  的偶数倍时, 相位的改变使得有源区驻波的波峰位置发生变化, 量子阱堆

的位置刚好由原来设计的波峰变成了波节, 此时的损耗大于增益, 信号光不能被放大, 在峰值波长处反而被吸收了, 形成负的增益峰。由于文献 [4] 中未考虑增益与波长间的 (5) 式, 因此图 4b 图中的曲线是连续的, 在  $\lambda_c/4$  的偶数倍处只是一个跳变点, 而并没有出现图 4a 图中所示的信号光不能被放大的区域。

图 5 中给出了当载流子浓度  $N = 1.32 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时, 有源区实际腔长固定不变而量子阱堆位置改变时,

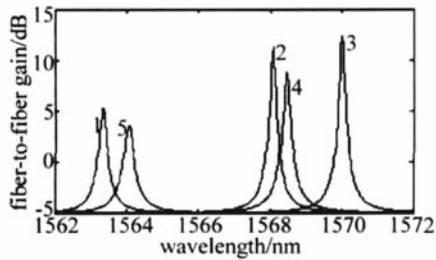


Fig 5 Fiber-to-fiber gain vs wavelength as variation of position of the quantum well stacks

MT-VCSOAs 所对应的增益变化曲线。假设中间量子阱堆位置固定不变, 两侧量子阱堆逐渐向中间靠近, 曲线 1~曲线 5 为两侧量子阱堆距中间量子阱堆同为 356.12nm, 381.12nm, 406.12nm, 431.12nm 和 456.12nm 时, 增益与入射波长的变化关系曲线。当偏离度都为 406.12nm 时, 量子阱堆分布与驻波波峰周期性地对应, 增益峰值最大, 且其峰值波长最长, 随着量子阱堆位置相对驻波波峰的偏离逐渐增大, 放大增益峰值降低并且向短波方向移动<sup>[9, 10]</sup>。

量子阱堆位置的改变, 使得量子阱堆偏离驻波波峰, 增益峰值随着偏离度的增加而下降。在增益峰值产生的波长范围内, 随着量子阱堆位置相对驻波波峰的偏离逐渐增大, 相同波长对应光学长度变短, 使得其增益峰值所对应波长向短波方向移动。

### 3 结 论

采用传输矩阵方法分析和讨论 MT-VCSOAs 的增

益以及波长调谐特性, 利用这种方法得出了与以往的实验相一致的结果, 证明了这种方法的可行性。并且, 采用这种方法不需要引入有效腔长和增益增强因子等参量, 简化了计算的过程, 试验结果直接与器件的物理结构相对应。通过研究分析, 得出了以下结论: 载流子浓度、顶层 DBRs 膜层周期数越大, 极值增益越大, 3dB 带宽越小; 空腔长度与谐振波长有一个周期性的对应关系, 且在长度为  $\lambda_c/4$  偶数倍时, 有 40nm 左右的范围出现负增益峰, 信号光不能被放大; 量子阱堆位置的改变, 不仅引起增益大小的改变, 还会导致增益峰值波长的偏移。

### 参 考 文 献

- [1] W EDNMANN D, MOELLER B, M KHALZIK R. Performance characteristics of vertical cavity semiconductor laser amplifier [J]. Electron Lett 1996 32(4): 342~343.
- [2] BJÖRLIN S, BOWERS E. Noise figure of vertical cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2002 38(1): 61~66.
- [3] CHEN Q, COLE G D, BJÖRLIN E S *et al*. First demonstration of a MEMS tunable vertical cavity SOA [J]. IEEE Photon Technology Letters 2004 16(6): 1438~1440.
- [4] COLE G D, BJÖRLIN E S, CHEN Q *et al*. MEMS-tunable vertical cavity SOAs [J]. IEEE J Q E, 2005, 41(3): 390~407.
- [5] COLE G D, BJÖRLIN E S, WANG C S *et al*. Widely tunable bottom-emitting vertical cavity SOAs [J]. IEEE Photon Technology Letters 2005 17(12): 2526~2528.
- [6] TANG J F, ZHENG Q. Application of membrane optics [M]. Shanghai Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1984 51 (in Chinese).
- [7] SUHARA T. Handout laser no kiso [M]. Beijing Science Press 2002 91~93 (in Chinese).
- [8] AGRAWAL G P, DUTTA N K. Semiconductor lasers [M]. 2nd ed New York: van Nostrand Reinhold Company 1993 319~333.
- [9] JIA X K, 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).
- [10] XU J H, LUO B, PAN W *et al*. Optimal design of the gain bandwidth of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on the couple cavities [J]. Laser Technology, 2006 30(1): 60~63 (in Chinese).

• 简 讯 •

### 高重复频率光参变放大激光器

据《Laser Focus World》报道, 最近, 意大利米兰综合大学的研究人员采用德国汉诺威大学新研制的二极管抽运 Yb:KYW (掺镱钾钨酸盐) 激光器作为抽运源, 与周期极化铌酸锂 (PPLN) 晶体构成光参变放大器, 在脉冲重复频率 1MHz 下, 输出激光能量 190nJ 脉冲宽度 220fs。信号光和闲频光的调谐范围分别在  $1.3\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$  和  $3.1\mu\text{m} \sim 4.6\mu\text{m}$ 。该器件结构简单、体积小, 在抽运源和光参变等激光技术方面都有创新。抽运源除采用通常的饱和吸收镜和啁啾镜进行被动锁模外, 关键是应用了高速电光腔倒空技术, 从而使器件能以 1MHz 的重频工作, 在波长 1030nm, 每个激光脉冲的输出能量为 1.2μJ。在光参变部分, 使用 2 块 PPLN 晶体, 晶体在  $25.9\mu\text{m} \sim 29.5\mu\text{m}$  范围具有 14 个极化周期, 通过变化晶体的位置实现调谐。

据说, 研究工作还将继续进行, 拟通过提高开关电压、减小电光晶体长度, 使抽运源输出更高的激光脉冲能量。在光参变技术上, 将采用新的 PPLN 晶体, 例如钽酸锂, 提高抗光损伤能力。

(曹三松 供稿)