

文章编号：1001-3806(2005)04-0377-03

传输矩阵法研究垂直腔半导体光放大器增益特性

贾习坤, 罗斌*, 潘伟, 姚海峰, 曹昌胜

(西南交通大学 计算机与通信工程学院, 成都 610031)

摘要：利用传输矩阵法研究垂直腔半导体光放大器 (VCSELs) 的增益及其带宽特性。研究了不同载流子浓度、DBR 膜层数对增益特性的影响, 发现了有源区内量子阱堆位置的改变将导致增益峰值波长移动。数值计算结果与实验结果相吻合。

关键词：垂直腔半导体光放大器; 增益; 带宽; 传输矩阵

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Research of gain of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on transfer matrix method

JA Xikun, LUO Bin, PAN Wei, YAO Hai-feng, CAO Chang-sheng

(Department of Computer and Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The gain and bandwidth of vertical cavity semiconductor optical amplifiers (VCSELs) were studied based on transfer matrix method. The different carrier density and layers number of DBR will affect the gain characteristic and the wavelength of the peak gain will shift with the variation of position of the quantum well stacks in active region. The result of calculation is agreement with the experiment.

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

引言

近年来, 垂直腔半导体光放大器 (VCSELs) 的研究引起人们的广泛关注。由于 VCSELs 克服了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, 并且具有低噪声、低制造成本等优势, 其在波长转换、光开关、光转发器、波分复用系统中有着广泛的应用前景^[1]。

VCSELs 的研究从短波长逐渐向长波长工作波段发展, 目前 1.3 μm 和 1.55 μm 波长的 VCSELs 均已在实验室研制成功^[1]。VCSELs 的性能如增益带宽^[2]、噪声特性^[3]等一直是人们研究的重点。BOWERS 小组通过优化 DBR 反射率以扩展 VCSELs 的增益带宽^[2]; 改进 VCSELs 有源区结构增强载流子限制, 从而提高它的效率和放大增益^[4]等。

在前期有关 VCSELs 理论研究的文献报道中一般将 DBR 作为理想硬镜面, 这样起作用的有效光腔几何

长度修正为有源区长度与两个 DBR 等效长度之和^[5], 此时可以将 VCSELs 腔体看作由 DBR 硬镜面和长度为有效腔长且腔内折射率均匀分布的有源区构成^[6], 腔内折射率则等于腔内所有膜层的折射率加权均值, 考虑到有源区量子阱堆与驻波波峰周期性对应的情况, 还需要引入增益增强系数 ζ ^[7], 对于整个 VCSELs 可以采用类似 F-P 腔放大器已知的增益公式进行研究。

本文中将采用传输矩阵法来研究 VCSELs 增益特性, 这种方法基于有源区由不同材料的势垒和量子阱分层结构组成, 因此, 可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, 对有源区各膜层进行分析, 建立其对应的特征矩阵。最后将有源区和 DBR 一起考虑, 建立传输矩阵模型, 并采用此模型对 VCSELs 的增益性能进行研究和分析。实际上, 在研究垂直腔半导体激光器微腔特性的相关文献工作中, 传输矩阵法已有所应用, 但它仅被用来分析构成 DBR 的 $\lambda/4$ 高低折射率膜层对器件的影响。而本文中所采用的传输矩阵法, 是将 VCSELs 整体作为研究的对象。其优点是, 不需引入有效腔长及增益增强系数 ζ ^[7], 当 VCSELs 材料或结构参数值改变时, 直接将变化后的参数带入特征矩阵计算, 就可得到与 VCSELs 实际结构的增益特性相一致的结果。

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: 贾习坤 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信及光器件研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: hclu@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2004-05-08; 收到修改稿日期: 2004-06-29

1 理论模型

1.1 垂直腔半导体光放大器(VCOSAs)的基本结构

图1为基本的VCOSAs结构示意图^[7],其整个腔体由两个DBR和DBR之间的有源区及GaAs基底组成,DBR由 $\lambda/4$ 光学厚度高低折射率不同的介质交替生成,其顶部和底部分别为13和25个膜层周期数,以InP为基层的有源区由3个量子阱堆组成,每个堆有7个压应变InAs_{0.5}P_{0.5}量子阱和In_{0.8}Ga_{0.2}P应变补偿势垒,抽运从GaAs基底注入,输入信号在顶层DRB耦合入VCOSAs并且从顶层输出。量子阱堆分布与驻波波峰周期性地对应,以使VCOSAs增益最大。

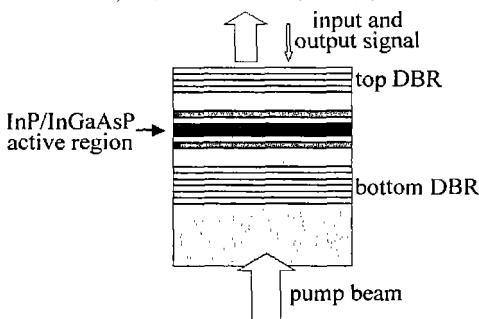


Fig 1 Schematic of VCOSAs

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^[8]:

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

式中, $\delta_j = k_0 \tilde{n}_j d_j$, \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, $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$, ω 为入射光波频率, c 为真空中的光速, λ 为真空中入射光波波长。

对VCOSAs有源区而言,由于载流子注入产生的激励效应,使介质复折射率的实部和虚部随载流子浓度N而发生改变^[9]。当载流子浓度变化不大时,复折射率实部的变化 Δn 与载流子浓度近似成正比^[10]:

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

b代表有效折射率随载流子浓度N变化的比例系数。折射率的虚部变化和增益(或损耗)有关^[9],可以得到激励效应下有源区 \tilde{n} 的一般表达式:

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

根据实验研究结果^[10],这里 $b = -1.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^3$ 。

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 \tilde{n} ,对于有源区的量子阱层,根据文献[7]中增益系数公式:

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

结合(3)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 \tilde{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。对于势垒层复折射率 \tilde{n} , (3)式中增益为0,虚部反映的是它的材料损耗。对于DBR和过渡区,忽略材料损耗, \tilde{n} 为介质材料折射率。

根据以上分析,可以得到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^[8]:

$$\frac{B}{C} = \prod_{j=1}^m M_j \frac{1}{n_{m+1}} \quad (5)$$

式中, m 为DBR和有源区总的膜层数, n_{m+1} 为基底折射率,此时便可得到VCOSAs在反射模式工作下的增益 G_r ^[8]:

$$G_r = \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right) \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right)^* \quad (6)$$

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

2 数值分析及讨论

为了将本文中方法所得到结果与已有文献结果相比较,这里以文献[6]中报道的VCOSAs器件结构和参数作为研究的依据。首先确定其主要参数值,以GaAs/AIAS为材料的DBR高低介质折射率分别为3.45,2.89,采用HLH结构,有源区实际厚度为1μm,有源区基层介质InP的材料折射率为3.17,InAs_{0.5}P_{0.5}量子阱和In_{0.8}Ga_{0.2}P势垒在无抽运时折射率分别为3.36,3.30,GaAs基底折射率为3.45,每个量子阱和势垒层的厚度为6.3nm,有源区两对对称基层厚度分别为0.1005μm,0.25775μm,有源区量子阱和势垒层的内部损耗系数 $\alpha = 15 \text{ cm}^{-1}$,增益拟合参量 $g_0 = 1580 \text{ cm}^{-1}$,透明载流子浓度 $N_{tr} = 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,载流子拟合参量 $N_s = -0.63 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

本文中重点考察小信号输入情况下的VCOSAs增益特性。在这种情况下,光子密度低,它对载流子密度的影响可以忽略。根据(6)式,就可以得到VCOSAs增益及其带宽的数值结果。

图2中画出了不同载流子浓度下的增益曲线。图中,1,2,3对应的载流子浓度分别为 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $2.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $3.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。由图可知,随着载流

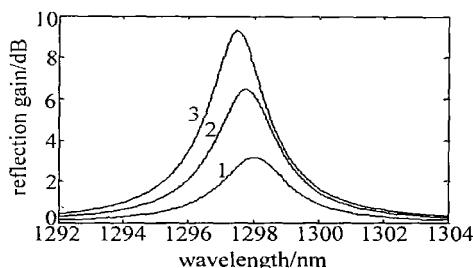


Fig 2 Calculated gain spectra at three different carrier densities

子浓度 N 的增加 , 增益峰值波长向短波长移动 , 从 (3) 式可以看出 , 有源区量子阱复折射率实部随着载流子浓度的增加而减小 , 使得有源区光学长度变短 , 从而导致了增益峰值波长向短波长移动。

图 3 为载流子浓度变化对 VCSOA s 增益峰值及增益带宽的影响 , 曲线 1 为增益带宽的变化 , 曲线 2 为增益峰值变化 , 随着注入载流子浓度的增大 , 增益峰值上升 , 增益带宽下降。

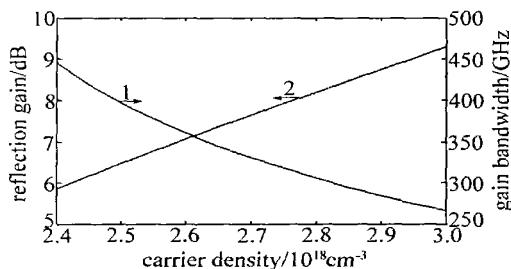


Fig 3 Gain and bandwidth versus carrier density

图 4 描述了载流子浓度为 $N = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时 , 顶部 DBR 膜层周期数改变对 VCSOA s 增益及其带宽的影响 , 虚线 1 和 2 分别表示增益带宽和增益变化趋势 , 底部 DBR 膜层周期数固定为 25 层 , 当顶部膜层从 9 层增加到 15 层时 , 增益峰值逐渐增大 , 增益带宽则随之下降。图 3、图 4 所得到的有关增益及其带宽结果 , 和以往的理论和实验研究结果是相符的^[18]。

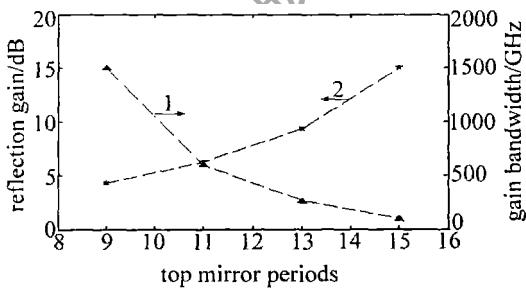


Fig 4 Gain and bandwidth as a function of top layer number of DBR

图 5 中给出了当载流子浓度为 $N = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 有源区实际腔长不变而量子阱堆位置改变时 , VCSOA s 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 1~5 为两侧量子阱堆距中间量子阱堆同为 $0.0505 \mu\text{m}$, $0.0755 \mu\text{m}$, $0.1005 \mu\text{m}$, $0.1255 \mu\text{m}$ 和 $0.1505 \mu\text{m}$ 时 , 增益与入射波长的变化关系曲线。当偏离度都为 $0.1005 \mu\text{m}$

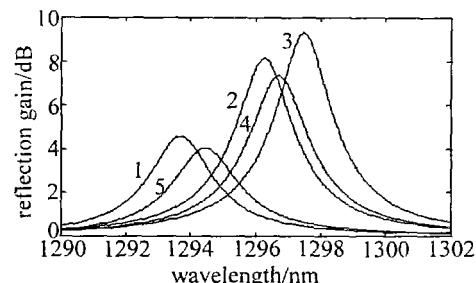


Fig 5 Gain & wavelength as variation of position of the quantum well stacks
时 , 量子阱堆分布与驻波波峰周期性地对应 , 增益峰值最大 , 且其峰值波长最长 , 随着量子阱堆位置相对驻波波峰的偏离逐渐增大 , 放大增益峰值降低并且向短波方向移动。

量子阱堆的位置改变 , 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 , 在以往采用 F-P 腔模型进行相关研究时 , 通过引入增益增强系数 ζ ^[18] 来反映这种物理效应。而增益峰值波长随有源区各膜层相对位置改变而产生偏移 , 这种现象在 F-P 腔模型中难以解释。因为在这种模型中是将有源区等效为一个整体来处理 , 量子阱内各膜层相对位置的改变不会影响有效腔长和腔内折射率的值 , 因此 , 由 F-P 腔模型定出的增益峰值波长不会改变。本文中所采用的传输矩阵法将有源区各膜层分别考虑 , 就可以发现有源区的等效光学长度会受到各膜层相对位置改变的影响 , 这就从物理上解释了增益峰值波长产生偏移的原因。图 6 就是图 5 中 5 条增益曲线所对应的不同量子阱堆位置情况下的有源区光学长度 , 可以看到 , 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 (曲线 3 为量子阱堆与驻波波峰周期性地对应的情况) , 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。

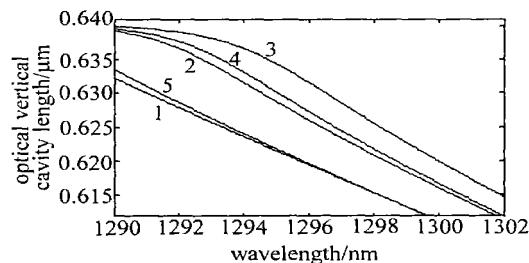


Fig 6 Optical length of active region versus wavelength as quantum well stacks in different position

3 结 论

采用传输矩阵方法分析和探讨 VCSOA s 的增益及带宽特性 , 利用这种方法得到了与以往的实验及理论研究相一致的结果 , 证明了这种方法的可行性。同时

(下转第 406 页)

$$y = (x - l + l') \frac{y_b}{x_a - l + l'}, \quad (13)$$

由(12)式,(13)式可得入射角*i*及折射光线的方程:

$$y = y_a + (x - x_a) \tan U'' \quad (14)$$

同理可以求得另外的一个交点*x_b*,*y_b*。

1.3 激光棒横截面能量图的绘制

由于光线在激光棒内是按指数衰减的。即:

$$E = E_0 \exp(-\alpha d) \quad (15)$$

式中,*E₀*是进入激光棒边界时的光能量,即*N*点的能量,α是激光棒的衰减系数,*d*是光线在激光棒内传播的距离。由(15)式可知下一个*i*点与上一个点*i-1*的能量关系为^[3]:

$$E_i = E_{i-1} \exp(-\alpha \Delta d_i) \quad (16)$$

Δ*d_i*是相邻两点间的距离,用灰度代表能量,则灰度值按(16)式变化。

2 结论

把以上光线追迹方程采用V ISUAL BASIC 5.0编制了程序,使之可以直观地看出激光棒内光强的相对分布,以用于指导进行LD线阵侧面抽运固体激光器的进一步设计和实验。从图上可以看出,所设计的LD侧面抽运方式中,激光棒内横截面光照均匀。且由于采用了共轭成像设计方法,所以,LD抽运光几乎全部都进入了激光棒内,光线耦合效率很高(超过95%以

(上接第379页)

该方法不需要引入有效腔长和增益增强系数等参量,所得出的结果直接与器件的结构相对应。还能够解释和预测一些新的物理现象,如随着载流子浓度的增加,有源区的等效折射率下降,增益峰值波长会向短波长移动;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移动等等。

参考文献

- [1] WIEDMANN D, MOELLER B, MICHALZIK R. Performance characteristics of vertical-cavity semiconductor laser amplifier [J]. Electron Lett, 1996, 32(4): 342~343.
- [2] PIPRED J, BJORN E S, BOWERS J E. Optical gain-bandwidth product of vertical-cavity amplifiers [J]. Electron Lett, 2001, 37(5): 298~299.
- [3] BJORN E S, BOWERS J E. Noise figure of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(1): 61~66.
- [4] BJORN E S, ABRAHAM P, PASQUARIELLO D et al. High gain, high efficiency vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. Indium Phosphide and Related Materials Conference, 2002, 12~16: 307~310.
- [5] 郭长志,陈水莲.分布反射面发射垂直微腔半导体激光器的微腔效应[J].物理学报,1997,46(9): 1731~1743.
- [6] 姚海峰,潘炜,罗斌 et al.新型垂直腔半导体光放大器中有效腔长的理论分析[J].激光杂志,2003,24(6): 9~10.
- [7] JOACHIM P, STAFFAN B, JOHN E B. Design and analysis of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(1): 127~133.
- [8] 唐晋发,郑权.应用薄膜光学[M].上海:上海科学技术出版社,1984.51.
- [9] 棚原敏明.半导体激光器基础[M].北京:科学出版社,2002.91~93.
- [10] AGRAWAL G P, DUTTA N K. Semiconductor lasers [M]. 2nd ed, New York: van Nostrand Reinhold Company, 1993. 319~333.

上),因此光光转换效率很高。从图上还可以看出,光强成近似三角形分布,与激光棒的基模模体积重合得比较好,是一种比较好的LD侧面抽运固体激光器耦合方式。

由程序可以看出,以上的LD侧面抽运固体激光棒的数值计算方法能够很好地指导LD侧面抽运源的设计,但是这只是一个特殊的耦合方式。比如对于更多LD阵列抽运方式、LD阵列抽运条状激光棒、反射面不是圆柱反射镜而是棱镜全反射面^[5]等等情况,都需要对该程序进行改造,以满足其通用性。但其光线追迹思想不变,有些方法,如能量的分割、光线的衰减等完全可以通用。

参考文献

- [1] MOON H J, YIJ H, HAN J et al. Efficient diffusive reflector-type diode side-pumped Nd-YAG rod laser with an optical slope efficiency of 55% [J]. Appl Opt, 1999, 38(9): 1772~1776.
- [2] 王海林,黄维玲,周卓尤 et al.二极管激光器运行特性的研究[J].激光技术,2002,26(1): 23~25.
- [3] LEE S, KM S K, YUN M et al. Design and fabrication of a diode-side-pumped Nd-YAG laser with a diffusive optical cavity for 500-W output power [J]. Appl Opt, 2002, 41(6): 1089~1094.
- [4] 安连生.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2000.50.
- [5] KONNO S, KOJIMA T, FUJIKAWA S et al. High-brightness 138W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd-YAG laser [J]. Opt Lett, 2000, 25(2): 105~107.