

文章编号: 0253-2239(2003)03-0341-07

# 锥形脊结构半导体光放大器的有限元分析\*

王 涛 王正选 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

**摘要:** 为提高半导体光放大器与单模光纤耦合效率,建立了半导体光放大器的锥形脊结构模型。在该模型下利用有限元数值模拟方法分析,计算了波导区折射率、锥尖宽度、条形波导尺寸、渐变折射率波导层对锥形脊结构模式扩展的影响。通过完善锥形脊结构参量的设计,获得了锥形脊结构半导体光放大器与单模光纤 95% 的耦合效率。

**关键词:** 激光器; 半导体光放大器; 锥形脊结构; 有限元法

中图分类号: TN383 文献标识码: A

## 1 引 言

半导体光放大器增益带宽较宽,而且平坦,具有较好的光谱特性,易于与其他光电子元件集成制成线路放大器、多波长激光器<sup>[1]</sup>、光开关<sup>[2]</sup>、波长转换器<sup>[3]</sup>等器件,因而越来越多地受到人们的重视。但半导体光放大器输出光束发散角大,且横向和侧向差异大,使之与单模光纤的耦合损耗较大,降低了半导体光放大器的放大性能。一些半导体器件的研究者设计并研制了一种锥形脊波导半导体激光器<sup>[4,5]</sup>,较大地提高了半导体激光器与单模光纤的耦合效率。我们将这一思想应用到半导体光放大器上,设计了一种锥形脊波导半导体光放大器。该放大器将基模“挤压”成近似圆对称的模式分布,并使光束的发散角大大减小,从而使放大器与单模光纤的耦合效率得以提高。

## 2 锥形脊半导体放大器的有限元数值模拟

### 2.1 锥形脊波导结构的有限元计算

锥形脊波导结构见图 1。紧贴有源区两侧各有 100 nm 渐变折射率(GRIN)波导层。条形波导宽度  $W$  为 2  $\mu\text{m}$ ,高度  $H$  为 2  $\mu\text{m}$ ,锥区长  $L$  为 500  $\mu\text{m}$ ,锥尖宽  $K$  为 0.7  $\mu\text{m}$ ;台面波导总厚度  $T$  为 8  $\mu\text{m}$ ,上面厚度  $T_1$  为 4  $\mu\text{m}$ ,宽度  $Z$  为 10  $\mu\text{m}$ ;有源层两侧波导材料组分相同;生长在衬底上的隔离层厚度  $S$

为 1  $\mu\text{m}$ ,锥区最窄处所在的波导面为光场出射面。

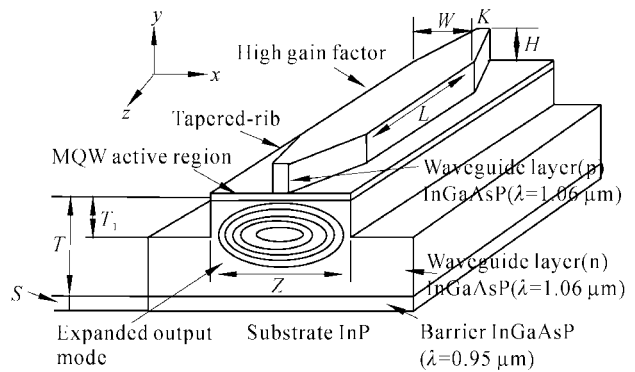


Fig. 1 The structure of tapered-rib waveguide

在波导中的光场模式可精确地划分为  $E_{pq}^x$  模和  $E_{pq}^y$  模,下标  $p$  和  $q$  分别代表电场在  $x$ 、 $y$  方向极值点的个数。在  $E_{pq}^x$  模式中,  $E_x$  和  $H_y$  占主导地位,其中  $E_x$  和  $H_y$  分别代表电场和磁场在  $x$ 、 $y$  方向的分量;相反,在  $E_{pq}^y$  模式中,  $E_y$  和  $H_x$  占主导地位,  $E_y$  和  $H_x$  分别代表电场和磁场在  $y$ 、 $x$  方向的分量。矢量有限元法可以进行这种精确的模式分析,但它需要三维上的考虑,而且,伪解<sup>[6]</sup>的消除也非常复杂,给分析带来了很大的困难。但对于介质分布较简单而非各向异性的情况,则完全可以将问题简化为近似的标量有限元方法 (ASFEM)<sup>[7]</sup>。在标量有限元方法中,用 TE 模来近似  $E_{pq}^x$  模,用 TM 模来近似  $E_{pq}^y$  模,这一方法已在光波导分析中获得了广泛的应用<sup>[8,9]</sup>。在本文的分析中,我们考虑的是单模波导,以 TE 模为对象(以  $E_{11}^x$  为主模)进行描述,则在时域场中,电磁场可表示为

$$E = E(x, y) \exp(-j\beta z) \exp(j\omega t), \quad (1)$$

$$H = H(x, y) \exp(-j\beta z) \exp(j\omega t). \quad (2)$$

根据麦克斯韦方程

\* 国家自然科学基金(69977011)资助课题。

E-mail: wangtao@mail. hust. edu. cn

收稿日期: 2001-12-10; 收到修改稿日期: 2002-04-01

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{H}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0 n^2 \mathbf{E}, \quad (4)$$

可以方便地推出下式

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0, \quad (5)$$

其中

$$k_0^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0, \quad (6)$$

$\omega$  为圆频率,  $\epsilon_0$ 、 $\mu_0$  分别为真空中材料的介电常量和磁导率,  $n$  为材料的折射率,  $k_0$  为真空中波矢, 且有关系式  $\beta = k_0 n$ ,  $\beta$  为  $z$  方向的传播常量。

对于 TE 模, 假设电场在  $y$  方向的值远远小于  $x$  方向, 并令  $y$  方向恒为零, 由(5)式, 可推得

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} - \beta^2 E_x + k_0^2 n^2 E_x = 0. \quad (7)$$

将所研究的区域离散为大量的三角元并进行有限元处理, 由(7)式可得近似的标量有限元公式:

$$[G]\{E_x\} - \beta^2 [M]\{E_x\} = \{0\}, \quad (8)$$

其中

$$[G] = \sum_e \iint_e \left( k_0^2 n_e^2 \{N\} \{N\}^T - \frac{\partial \{N\}}{\partial x} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial x} - \frac{\partial \{N\}}{\partial y} \frac{\partial \{N\}^T}{\partial y} \right) dx dy, \quad (9)$$

$$[M] = \sum_e \iint_e \{N\} \{N\}^T dx dy. \quad (10)$$

在此,  $\{N\}$  为形状函数,  $\{E_x\}$  为节点处的电场值,  $e$  表示划分的小三角元,  $T$  表示转置,  $\Sigma_e$  表示对所有三角元的求和,  $\iint_e$  表示在每个三角元上的积分,  $\{0\}$  表示有限元中的零向量。

为了取得较高的计算精度, 有必要保持一定数量的节点。在网格划分中, 重点研究的区域要适当细分, 同时介质的分层处要有节点。因为我们采用的是阶梯近似的办法, 所以锥形区域要进行细分, 以保证每一阶梯边缘与空气介质的交界处都有节点。对该结构我们进行了如下细分, 见图 2。

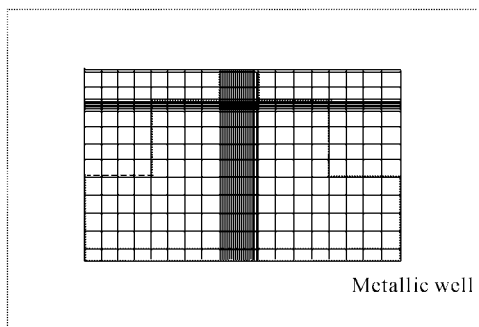


Fig. 2 Finite element grid

从理论上讲, 波导中的电磁场会延伸到无穷远处, 尽管远处的强度很小。但对于我们的数值模拟计算来讲, 无穷远处的场是不能得到的。我们在近场圆化结构边缘围一道“墙”, 并假设电磁场不能穿越这堵墙<sup>[10]</sup>, 即在该处为零。在本文计算中, 我们取墙与波导结构的距离为  $60 \mu\text{m}$ 。最后计算出放大器与单模光纤的耦合效率<sup>[11]</sup>:

$$\eta = -10 \lg \left( \frac{\left| \iint_A \psi_1 \psi_2^* ds \right|^2}{\iint_A \psi_1 \psi_1^* ds \iint_A \psi_2 \psi_2^* ds} \right) \text{ (dB)}, \quad (11)$$

式中,  $\psi_1$  和  $\psi_2$  分别为放大器与单模光纤端面模场,  $A$  为耦合面。为了使用有限元算法计算, 将场函数进行离散化处理, 同时将耦合面离散化, 分别求积分然后再求和。这样, 上式变化为

$$\eta = -10 \lg \left( \frac{\left| \sum_{m=1}^n \iint_{A_m} \psi_1 \psi_2^* ds \right|^2}{\sum_{m=1}^n \iint_{A_m} \psi_1 \psi_1^* ds \sum_{m=1}^n \iint_{A_m} \psi_2 \psi_2^* ds} \right) \text{ (dB)}, \quad (12)$$

其中,  $n$  表示将耦合面  $A$  离散化为  $n$  个小面,  $A_m$  为第  $m$  个面的面积。

## 2.2 锥形波导各截面处模场演变情况

我们希望半导体光放大器扩展后的模场与单模光纤端面模场尽可能的匹配。用有限元法追踪在一定条件下模场的演变规律, 可以更细致地洞察模场圆化的机理, 找出模场圆化的最佳条件。波导传输过程中基模形状在不断发生地变化, 这是一个三维问题, 在本文中我们只是在一些特定的截面上来分析光斑的形状, 将三维的问题简化为两维的问题来分析, 实际光斑的测量也是如此。我们以出射面处为坐标原点, 模拟出了光场在波导结构中距出射面  $t = 500 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $0$  处的模场分布图。三处模场分布图分别对应图 3(a)、图 3(b)、图 3(c), 图中  $y$  方向坐标值为  $69 \sim 69.35 \mu\text{m}$  的区域对应有源区部分,  $69.35 \sim 71.45 \mu\text{m}$  区域对应条形波导部分,  $61 \sim 69 \mu\text{m}$  区域对应台面波导部分;  $x$  方向坐标值为  $68 \sim 70 \mu\text{m}$  区域对应条形波导所处范围。以下模场分布图均如此对应。

可以看到, 模场有一个不断地向下面扩散的过程。在光场进入锥区前, 由于波导的限制, 模场基本上在有源区部分分布, 进入下面波导层的能量很少, 是一个长轴与短轴之比大约为 4 的椭圆光斑[见图 3(a)], 这与普通半导体光放大器或者半导体激光器的模场很相似; 随着锥区的不断变窄, 有源区上面的

锥形波导对光场的限制作用逐渐加强,而下面的台面波导由于结构参量不变,对光场限制能力也不变,使

得光场在前进的过程中向下面的波导层扩散(由于波导的限制作用,光场并不会扩散到波导结构之外)。

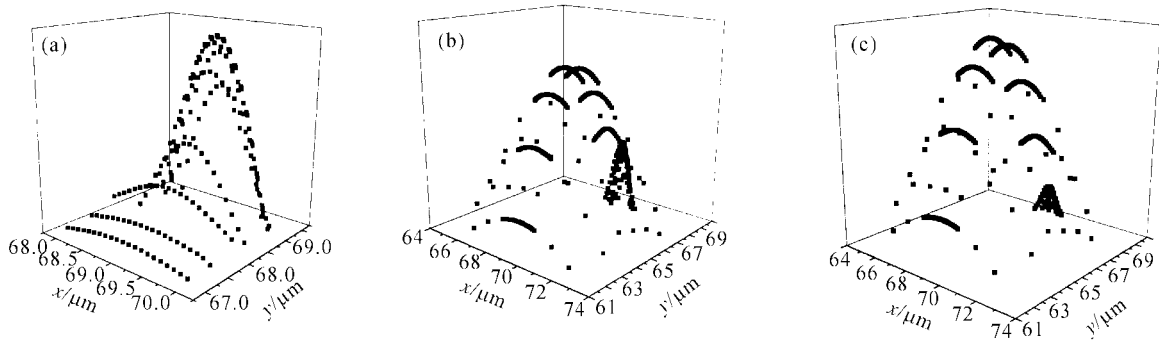


Fig. 3 The modal profiles on different cross-sections with distance  $t$  from the origin.

(a)  $t=500 \mu\text{m}$ ; (b)  $t=250 \mu\text{m}$ ; (c)  $t=0$

从图 3(a)到图 3(b),可以发现变化非常明显,模场已几乎完全跑到了下面的波导层,近似一个圆形的分布,上面的波导层只有少量能量。这是一个变化剧烈的区域,这也提示我们对这一模场扩展的主要发生区域要给予特别的注意。图 3(b)到图 3(c)的变化并不大,有源区及上面的波导层只有很少的能量存在,模场已几乎完全跑到了下面的区域,近似一个圆斑。这说明模场的扩展功能已在前一个区域基本完成,该过程是一个模斑形状的圆化过程,使得锥形脊放大器与光纤的耦合效率更高。

### 2.3 波导区折射率对模场圆化的影响

折射率是波导的一个重要参量,它对模场的扩展影响很大。正是波导区与有源区折射率之差,才对光场有一个限制作用。所以合理地设计波导区折射率,才能得到对光场的有效限制与引导,是设计锥形脊结构光放大器的一个关键。其它参量不变,我们将波导区折射率从原来的 3.52 减少为 3.51,经过计算,得到的模场分布图如图 4 所示;将波导区折射率从原来的 3.52 增加至 3.53,得到了模场分布图如图 5 所示。

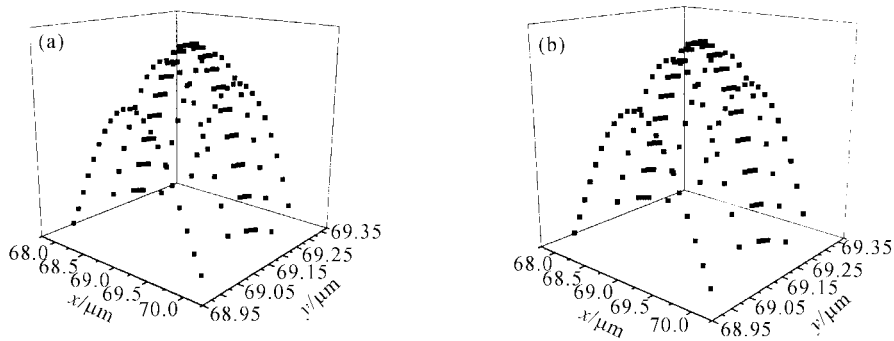


Fig. 4 The effect of decreasing refractive index on the modes. (a)  $t=500 \mu\text{m}$ ; (b)  $t=0$

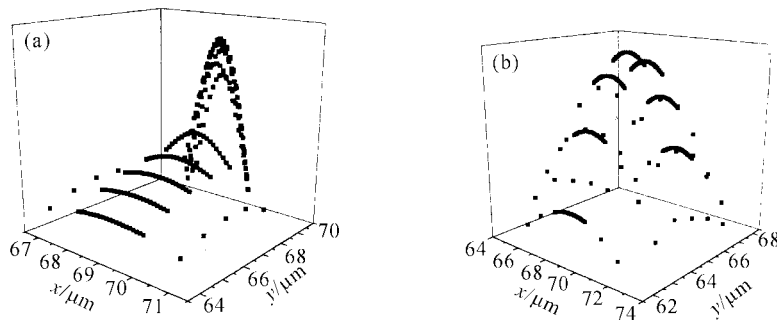


Fig. 5 The effect of increasing refractive index of guide layer on the modes. (a)  $t=500 \mu\text{m}$ ; (b)  $t=0$

可以看到在图 4(a)中,光场被完全限制在了有源区狭窄的区域内,光斑长轴与短轴之比为 50,与图 3(a)相比,光斑椭圆得更厉害。这是由于波导区折射率减小,使它与有源区折射率差变大,对光场的限制作用增强,对光斑在横向有一个压迫作用,使得光斑更为椭圆。在图 4(b)中,虽然大部分光能量已扩散到了下面波导区,但与图 3(c)相比,仍有较多能量残留在上面波导区,不利于锥形脊结构与单模光纤的耦合。这是因为波导区折射率减小,使下面波导对光场的限制作用也增强,模场穿过有源区向下面扩展变得更为困难。

由图 5(a)可知,在光场未进入锥形波导之前,模场已延伸到了下面的波导层,可见这种设计不利于取得较大的增益。主要是由于波导层与有源区折射率差变小使得对模场的限制能力降低,在未经模场转换之前,即有一部分能量脱离波导的限制而扩散到了下面区域。在图 5(b)中,模场已完全扩散到了下面的波导层,上面波导不再有残留的能量,它与图 3(c)相比,模场扩展更加彻底、显著。但它的光放大能力太差,甚至可能半导体光放大器将无光放大作用,所以这种设计并不可取。

我们给出了锥形脊结构与单模光纤耦合效率与折射率大小的关系(图 6)。可以看到,耦合效率随折射率的增大而升高。根据本节的讨论,波导区折射率低于 3.52 不利于锥形脊结构与单模光纤的耦合;波导区折射率高于 3.52,半导体光放大器光放大能力较差。因而最佳的波导区折射率可选为 3.52。

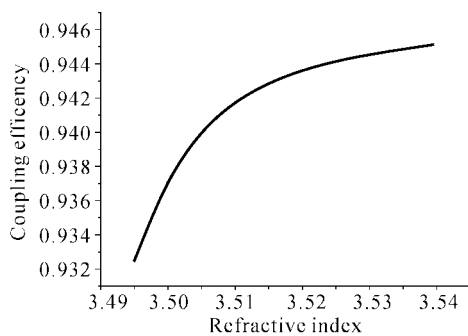


Fig. 6 The relationship between refractive index and coupling efficiency

## 2.4 波导结构对模场圆化的影响

### 2.4.1 锥尖宽度对模场圆化的影响

锥尖的宽度对模场的影响甚大,锥尖太宽,不能实现模场的扩展;锥尖太窄,工艺上又很困难,很多锥形波导结构的设计就是因为锥尖太窄而难于有其应用价值。我们模拟了锥尖宽度为  $w = 1.4 \mu\text{m}$ 、 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$  时的模场分布,结果见图 7。

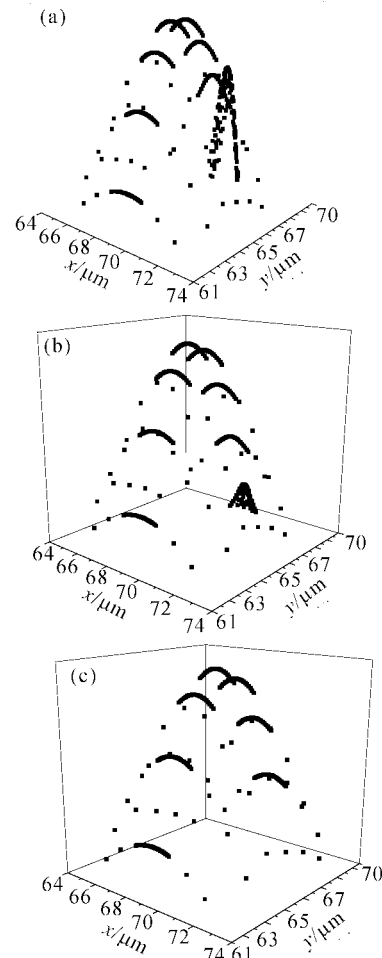


Fig. 7 The modes in the tapered-rib semiconductor optical amplifier with different widths of tapered-rib end.

(a)  $w = 1.4 \mu\text{m}$ ; (b)  $w = 1.0 \mu\text{m}$ ; (c)  $w = 0.6 \mu\text{m}$

由图 7(a)可知,模场的转换尚未完成,尽管锥尖较宽,工艺上比较容易实现,但它的模场还不是近似圆形的分布,与单模光纤的模场也不匹配,耦合效率会很低。在图 7(b)中,模场的转换已基本完成,与单模光纤的耦合效率达 93.76%。在图 7(c)中,模场的分布与图 7(b)相比差别不大,耦合效率也相差无几,为 93.85%,但  $0.6 \mu\text{m}$  的锥尖比起前者工艺要难得多。

我们计算出了锥尖宽度与单模光纤的耦合效率的关系,见图 8。

当锥宽小于  $1.4 \mu\text{m}$  时,耦合效率很高,且锥宽在  $0 \sim 1.4 \mu\text{m}$  的范围内变化时保持平坦;但当锥宽大于  $1.4 \mu\text{m}$  时,耦合效率急剧下降。这说明当锥宽窄到一定程度时,模场转换已经完成,锥尖的继续变窄已没有必要。综合考虑,锥宽的设计以  $0.8 \sim 1.2 \mu\text{m}$  为宜。锥宽太小工艺上过于困难,锥宽太大亦不可取。

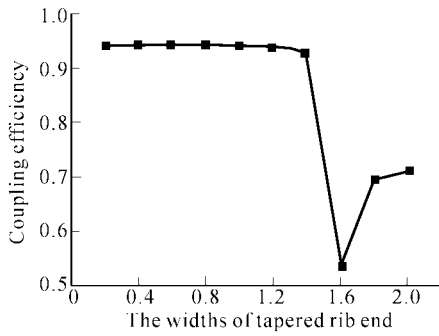


Fig. 8 The relationship between the widths of tapered-rib end and coupling efficiency

### 2.4.2 有源区上面的条形波导几何参量对模场圆化的影响

条形波导层的厚度与宽度大约都为  $2 \mu\text{m}$ , 主要的作用是在光场进入锥形波导之前, 与下面的波导层一起形成对有源区的有效限制。它的结构尤其是它的宽度对器件的影响很大。在其它参量不变的情况下, 我们计算了在宽度为  $2.4 \mu\text{m}$  时的模场分布, 如图 9; 在宽度为  $1.6 \mu\text{m}$  时, 模场分布见图 10。

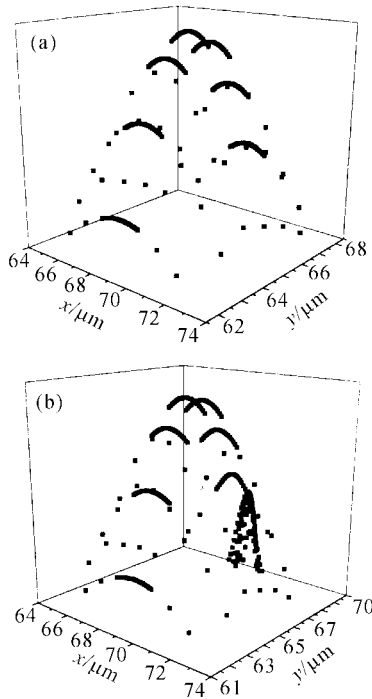


Fig. 9 The mode profiles in the tapered-rib semiconductor optical amplifier with  $2.4 \mu\text{m}$  width of rib (a)  $t=500 \mu\text{m}$ , (b)  $t=0$

在图 9(a)中, 模场已不再局限于有源区内分布转而向上面的空间发展。它的模场也不再是一个椭圆, 这不利于实现较大的增益。这表明由于上层波导的增宽, 它的有效折射率变大, 使得它对有源区内模场限制能力降低, 光场受上面的限制减弱, 而向上

移动。在图 9(b)中, 模场的转换并未彻底, 仍有一部分能量残留在上面波导层。我们计算得到的锥区最窄部与单模光纤耦合效率为  $94.3\%$ , 比宽度为  $2 \mu\text{m}$  时的稍小一些, 这也证实了模场的转换尚未彻底, 与光纤的模场不匹配。

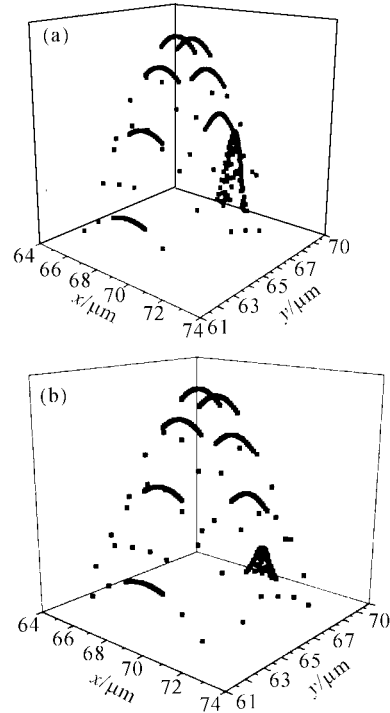


Fig. 10 The mode profiles in the tapered-rib semiconductor optical amplifier with  $1.6 \mu\text{m}$  width of rib (a)  $t=500 \mu\text{m}$ , (b)  $t=0$

图 10(a)与图 9(a)相反, 模场向下面的波导层扩散, 不利于实现较大的增益。这是由于上层波导的变窄, 它的有效折射率变小, 使得它对有源区内模场限制能力增强, 光场受上面的限制增强而向下扩展。

条形波导宽度  $w$  与耦合效率的关系见图 11。

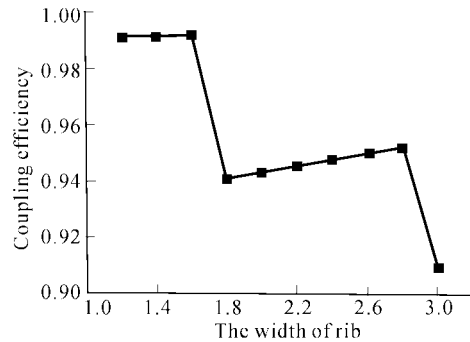


Fig. 11 The relationship between the widths of rib and coupling efficiency

可以看到, 耦合效率在条宽为  $1.6 \sim 1.8 \mu\text{m}$  时变化最为剧烈, 但当条宽大于  $1.8 \mu\text{m}$  时, 耦合效率会轻微上升。有源区上面的条形波导宽度对器件的影响

很关键,太窄时,会将模场压缩到下面的区域,不能得到较大增益;太宽时,又会将模场赶到上面的区域,也不能得到较大增益,并且会使器件的模场转换不彻底,能量转换效率降低,与光纤的耦合减弱。

#### 2.4.3 渐变折射率波导层对模场圆化的影响

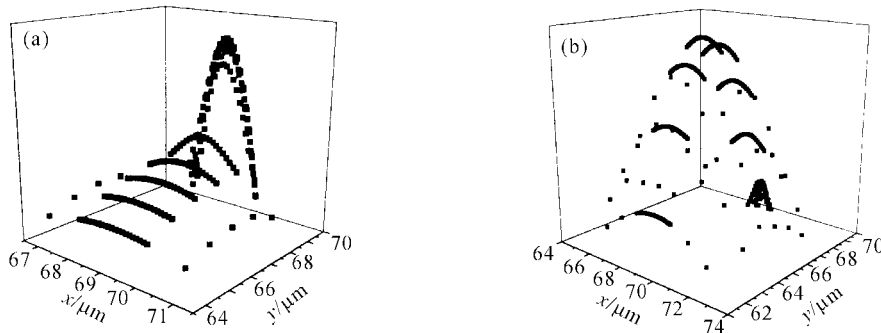


Fig. 12 The mode profiles in tapered-rib semiconductor optical amplifier without GRIN. (a)  $t=500 \mu\text{m}$ ; (b)  $t=0$

在图 12(a)中,波导在横向已不能对模场进行有效的限制,在模场未发生转换时相当一部分能量就已经扩散到了有源区下面,使器件不能得到较大增益。事实上,渐变折射率波导层的存在不仅提高光学限制因子,还有效地增加了载流子注入。而且这等效于加厚了有源层,优化了势垒高度和厚度,使激光器的远场特性有大幅度改善。在锥形脊结构中,渐变折射率波导层不仅可以降低锥区的辐射损耗,而且可以改变模斑形状,对模场分布有一个调节作用,使之接近单模光纤的高斯场分布。

**总结** 为满足半导体光放大器与单模光纤的高效耦合,我们提出并设计了锥形脊半导体光放大器模型。该结构半导体光放大器在锥形波导区域将有源区中获得增益放大的模场扩展到下面的波导层,使模场更加圆化,获得高的光纤耦合效率。我们分别分析了波导区折射率、条形波导参量、锥尖的宽度、渐变折射率波导层对变化中模场的影响。在本文的特定条件下获得了一组参量:波导区折射率为 3.52;锥尖宽以  $0.8\sim 1.2 \mu\text{m}$  为宜;条形波导层的厚度与宽度大约都为  $2 \mu\text{m}$ 。通过设计,我们获得了与单模光纤 95% 的耦合效率。文献[12]研制成功锥形脊波导半导体激光器,其结构参量与本文设计的参量基本相符。进一步证明了该模型的正确性与合理性。

#### 参 考 文 献

1 Shi H, Alphonse G A, Connolly J C *et al.*.  $20\times 5$  Gbit/s optical WDM transmitter using single-stripe multiwavelength modelocked semiconductor laser. *IEEE Electron. Lett.*, 1998, **34**(2):179~181

渐变折射率波导层是分布在有源层两侧很薄的波导区域,它在有源层两侧呈对称分布,折射率有一个逐渐变化的过程。材料参量及成分分布见参考文献[12]。它的存在对器件的影响很大,我们模拟了在没有这一波导层时的模场分布,结果见图 12。

2 Toliver P, Runser R J, Glesk I *et al.*. Comparison of three nonlinear interferometric optical switch geometries. *Opt. Commun.*, 2000, **175**(3):365~373

3 Dagens B, Janz C, Leclerc D *et al.*. Design optimization of all-active Mach-Zehnder wavelength converters. *IEEE Electron. Lett.*, 1999, **11**(4):424~426

4 Smith R E, Sullivan C T, Vawter G A *et al.*. Reduced coupling loss using a tapered-rib adiabatic-following fiber coupler. *IEEE Electron. Lett.*, 1996, **18**(8):1052~1054

5 Ben-Michael R, Korn U, Muller B I *et al.*. InP-based multiple quantum well lasers with an integrated tapered beam expander waveguide. *IEEE Electron. Lett.*, 1994, **6**(8):1412~1414

6 Rahman B M A, Davies J B. Finite-element analysis of optical and microwave waveguide problems. *IEEE Trans. MTT*, 1984, **32**(1):20~28

7 Hayata K, Koshiha M, Suzuki M. Lateral mode analysis of buried heterostructure diode lasers by the finite-element method. *J. Quant. Electron.*, 1986, **22**(6):781~788

8 Mabaya N, Lagasse P E, Vandenbulcke P. Finite element analysis of optical waveguides. *IEEE Trans. MTT.*, 1981, **29**(2):600~605

9 Koshiha M, Hayata K, Suzuki M. Approximate scalar finite element analysis of anisotropic optical waveguides. *Electron. Lett.*, 1982, **18**(1):411~413

10 Mitomi O, Kasaya K, Miyazawa H. Design of a single-mode tapered waveguide for low-loss chip-to-fiber coupling. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(8):1787~1793

11 Huang Dexiu, Liu Xuefeng. *Semiconductor Lasers and Their Applications* (半导体激光器及其应用), Beijing: National Defence Industry Press

12 Vawter G A, Smith R E, Hou H *et al.*. Semiconductor laser with tapered-rib adiabatic following fiber coupler for expanded output-mode diameter. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1997, **9**(4):425~427

## Finite Element Analysis of The Tapered-Rib Semiconductor Optical Amplifier

Wang Tao Wang Zhengxuan Huang Dexiu

*(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)*

(Received 10 December 2001; revised 1 April 2002)

**Abstract:** In order to improve the coupling efficiency of the semiconductor optical amplifier with a single-mode fiber, a model of a tapered-rib semiconductor optical amplifier is presented. The effects of the index of waveguide region, the width of tapered-rib end waveguide, the structure of rib waveguide and graded refractive index (GRIN) waveguide on the expanded output-mode of the tapered-rib waveguide are studied and calculated by using the finite element method. Coupling efficiency of 95% for the tapered-rib semiconductor optical amplifier and the single-mode fiber is obtained by optimizing the structure of the tapered-rib semiconductor optical amplifier.

**Key words:** lasers; semiconductor optical amplifier; structure of tapered-rib; finite element method