

文章编号: 0253-2239(2006)12-1819-4

隧道再生四有源区大功率半导体激光器^{*}

李建军 韩 军 邓 军 崔碧峰 廉 鹏 邹德恕 沈光地

(北京工业大学北京光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 利用隧道再生原理实现半导体激光器在低注入电流下的高光功率输出。通过传输矩阵法对隧道再生四有源区光耦合半导体激光器的模式特性进行了理论分析, 指出器件的激射模式应为 TE_3 , 且存在最优的内限制层厚度。利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)外延法生长了内限制层厚度分别为 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 的器件。内限制层厚度等于 $0.5 \mu\text{m}$ 的器件的 $P-I$ 特性最好, 腔面未镀膜时, 在 2 A 的注入电流下其光输出功率大于 5 W , P/I 斜率达 2.74 W/A 。结果表明, 为了得到尽可能高的光输出功率, 需要合理地设计隧道再生多源区激光器的内限制层厚度。

关键词: 激光器; 隧道结; 金属有机物化学气相沉积; 量子阱

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Tunnel Regeneration High-Power Semiconductor Laser with Four Active Regions

Li Jianjun Han Jun Deng Jun Cui Bifeng Lian Peng Zou Desu Shen Guangdi

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: The principle of tunnel regeneration is used to raise the optical output power of semiconductor lasers at lower injected current. The optical modes are analyzed through the transfer matrix method for the tunnel regeneration semiconductor laser with four optical coupled active regions. It is shown that TE_3 should be the lasing mode, and there exists an optimum thickness for the inner cladding layers. Devices with inner cladding layer thickness of $0.3 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ and $0.7 \mu\text{m}$ are epitaxially grown by metal organic chemical vapor deposition method (MOCVD), respectively. The device with $0.5 \mu\text{m}$ inner cladding thickness exhibits the best $P-I$ characteristics, the optical power exceeds 5 W under 2 A driving current without facet coating, and the slope efficiency reaches 2.74 W/A . The results show that the thickness of the inner cladding layers should be designed properly so that a higher optical output power can be obtained.

Key words: lasers; tunnel junction; metal organic chemical vapor deposition (MOCVD); quantum well

1 引 言

由于大功率半导体激光器具有体积小, 电光转换效率高优点而被广泛应用于医疗、印刷、焊接、抽运^[1,2]和通信等行业。为了提高半导体激光的输出功率, 通常是通过提高注入电流实现的, 但注入电流的提高引起器件内部产生的热量呈平方量级增长, 最终导致器件的电热烧毁。而对于隧道带间级联多源区半导体激光器(Multi-active region laser

diode, MALD)^[3,4], 在与常规半导体激光器有相同输入电流时却有较高的光输出功率。

隧道带间级联半导体激光器的基本原理是通过反向偏置的半导体隧道结将多个子有源区级联起来, 从 n 型电极注入的一个电子在第一有源区中掉入价带辐射复合并发射一个光子, 之后, 掉入价带的电子隧穿通过反向偏置的隧道结后在第二个有源区又发射一个光子。如果用 $n-1$ 个隧道结将 n 个有

^{*} 国家 973 计划(G20000683-02)和北京市优秀人才培养专项经费(67002013200303)资助课题。

作者简介: 李建军(1966~), 男, 河北张家口人, 副教授, 博士, 主要从事半导体光电子器件的研究及其金属有机物化学气相沉积生长和半导体器件的计算机模拟。E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

收稿日期: 2006-03-16; 收到修改稿日期: 2006-05-08

源区级联起来,则从电极注入的一个电子将会发射 n 个光子,内量子效率成倍增加。从理论上说,体现在器件的外部特性上就是光输出功率成倍增大,或者说,在与常规半导体激光器有相同的光输出功率下,多有源区半导体激光器的注入电流成倍减小^[3,4]。如将各有源区的光场强耦合,则可制成大光腔结构,减小远场发散角^[5]。如果各有源区的带隙不同,则可制成多波长激光器^[6]。

目前国外已报道的多有源区半导体激光器的各有源区间的光场是非耦合的^[7],有源区间距较远,但有源区间距大会引入如下问题:第一,不利于器件的散热;第二,使电流的横向扩展加重,阈值提高,效率降低;第三,由于电流横向扩展和纵向散热的影响,有源区的数目不能太多。利用 EMCORE D125 金属有机物化学气相沉积系统,通过减小有源区的间距,生长了各有源区间光场相互耦合的多有源区半导体激光器结构。根据理论分析,通过优化有源区间距,所制备的四有源区光耦合激光器在 2 A 注入电流下的单面未镀膜光输出功率达到了 5.02 W, P/I 斜率达到了 2.74 W/A。

2 理论分析

图 1 给出了四有源区多有源区半导体激光器的外延生长结构图。整个结构生长在(100)偏向[111] 2°的 n^+ GaAs 衬底上,每个有源区的 n 型和 p 型光限制层都是掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 材料,其中最底层 n 型光限制层的厚度为 $1.5 \mu\text{m}$,最顶层 p 型光限制层的厚度为 $1.4 \mu\text{m}$,其它内部光

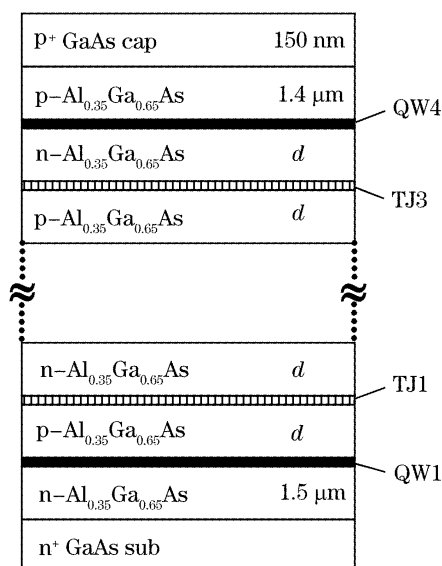


图 1 4 有源区半导体激光器外延结构图

Fig. 1 Epitaxial structure of the four-active-region laser diode

限制层的厚度都是 d ;隧道结是 50 nm 厚的 GaAs p - n 结;有源区是 i 型的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱,阱宽 8 nm,相应于 980 nm 的激射波长;每个有源区的波导层采用梯度折射率分别限制异质结 (GRIN-SCH) 结构。

对于图 1 所示多有源区半导体激光器外延结构,当 $d=0.5 \mu\text{m}$ 时,我们采用传输矩阵法^[8]模拟了器件中垂直方向的光场近场的分布情况,结果如图 2 所示,图中同时给出了器件折射率的分布情况,其中 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 对波长为 980 nm 光的折射率取为 3.6, AlGaAs 材料折射率的选取见文献^[9]。图中 QW1, QW2, QW3 和 QW4 分别表示 4 个量子阱有源区,而 TJ1, TJ2 和 TJ3 分别表示 3 个隧道结。由图 2 的模拟结果可见,该波导结构可允许有四个 TE 导波模式存在,即 TE_0 、 TE_1 、 TE_2 和 TE_3 ,而对于实际器件究竟是哪个模式激射工作,将决定于各模式的模增益大小。模式 TE_m 的模增益 G_m 为

$$G_m = \int \Gamma_m(x) \alpha(x) dx, \quad (1)$$

其中 $\Gamma_m(x) dx$ 是在 $x-x+dx$ 范围内 TE_m 模的光限制因子, $\alpha(x)$ 是光吸收系数(小于零)或光增益(大于零)。半导体激光器的激射条件要求 $G_m > 0$,以补偿由于光输出引起的腔面损耗。由于光增益只发生在量子阱有源区,其它区域都是损耗区,特别是隧道结处的自由载流子对光场有很强的吸收,因此由式(1)可见,激射模式所对应的有源区的光限制因子应最大,而在隧道结吸收区处的光限制因子应最小。由图 2 可见,满足该条件的模式应是 TE_3 模。

对于激射模式 TE_3 ,当隧道结两边的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 限制层厚度 d 不同时,模拟得到的光增益有源区和光损耗最大的隧道结区的光限制因子分别如图 3 所示。由图 3 可见,与上述定性分析一致,在整个模拟范围内, TE_3 在量子阱区的光限制因子 Γ_{QW} 最大,而在隧道结区的光限制因子 Γ_{TJ} 最小。随 d 的增大, TE_3 在隧道结处的光限制因子 Γ_{TJ} 减小,当 d 大于 $0.5 \mu\text{m}$ 后, Γ_{TJ} 的减小不再明显。当 d 大于 $0.25 \mu\text{m}$ 后, TE_3 在量子阱区的光限制因子 Γ_{QW} 也随 d 的增大而减小。可见, d 存在一最佳值,太小和太大的 d 都不利于器件 P - I 特性的改善。 d 的最佳值取决于有源区增益和隧道结损耗的相对大小,较小的 d 有利于充分利用有源区的光增益,但隧道结损耗的影响也较大;反之,较大的 d 虽然可降低隧道结损耗的影响,但有源区光增益的利用率又降低了。

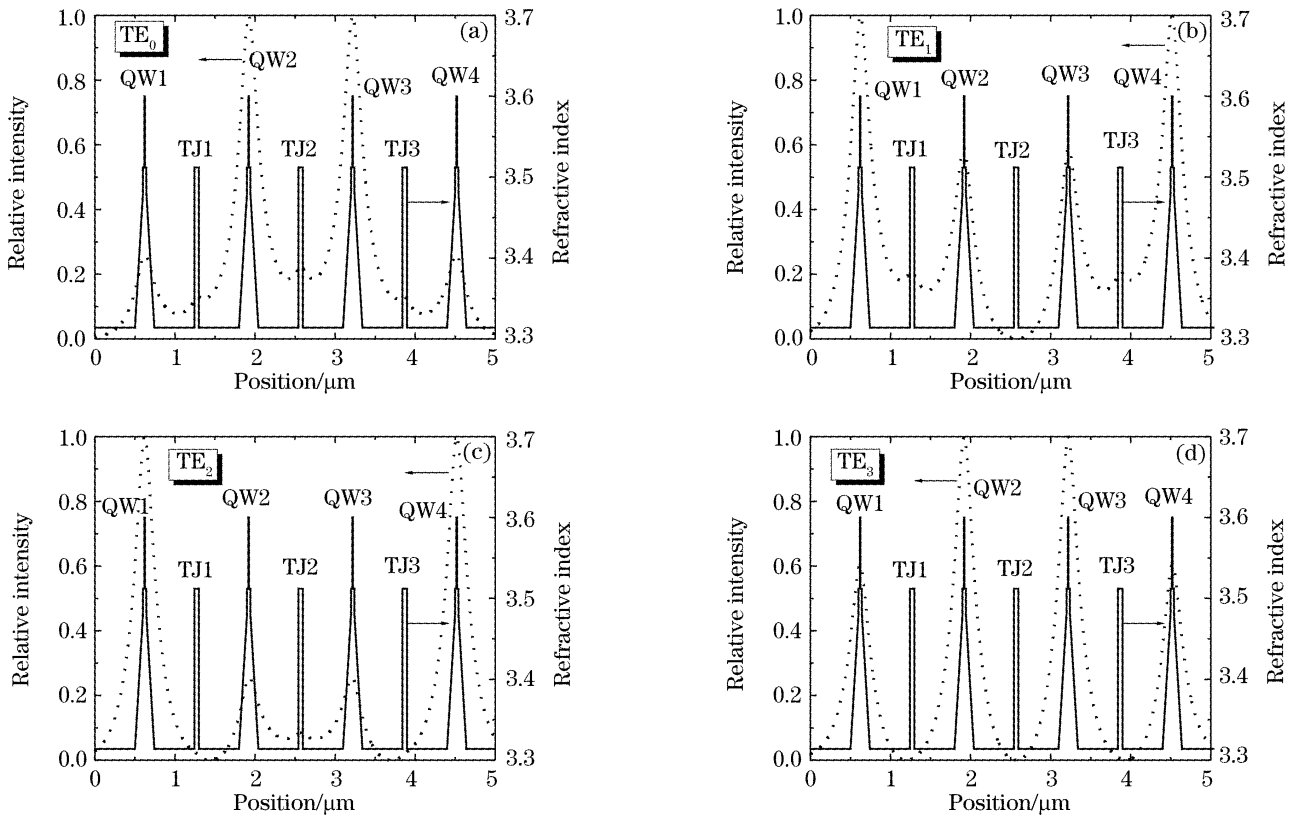
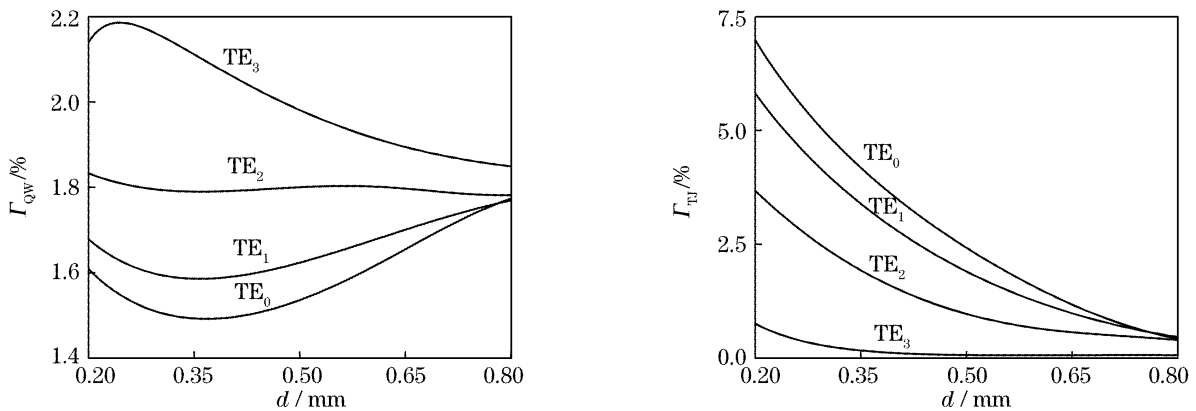


图 2 四有源区半导体激光器的波导结构及不同模式的近场

Fig. 2 Waveguide and near field with different modes of the four-active-region laser diode

图 3 量子阱有源区(a)和隧道结(b)的光限制因子随 d 的变化关系Fig. 3 Relationship of the confinement factor in quantum well active regions (a) and tunnel junctions (b) with d

3 器件制备

根据图 1 所示结构,分别取 d 等于 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$,利用 EMCORE D125 LP-MOCVD 对其进行了外延生长。材料生长中的 III 族源分别是 TMAI、TMGa 和 TMIIn, V 族源是纯度为 100% 的 AsH_3 , p 型掺杂源是 CCl_4 , 隧道结处的 n 型掺杂源是 Si_2H_6 , 其它区域的 n 型掺杂源是 SiH_4 。隧道结的生长温度为 570°C , 其他区的生长温度为 730°C , 反应室压力为 80 mbar, 生长速率为 $2\sim 3 \mu\text{m/h}$, V/III 比大于 100, 生长过程中, 衬底在马达的带动下以 1000 r/min 的速度高速旋转以保证材

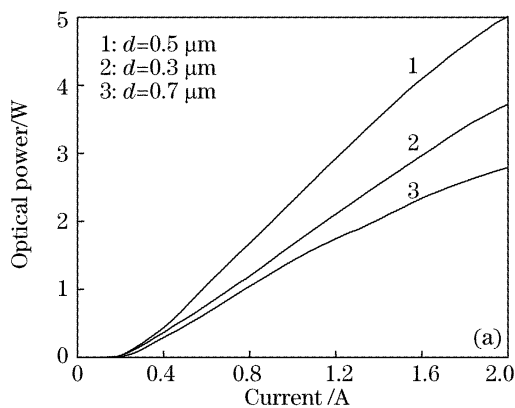
料生长的均匀性。

对于经金属有机物化学气相沉积外延好的多源区半导体激光器外延片,制备了微腐蚀台面脊形波导结构激光器,管芯的台面腐蚀深度为 $0.3 \mu\text{m}$, 正面电极条宽为 $90 \mu\text{m}$, 腔长为 $650 \mu\text{m}$ 。具体工艺流程为: 腐蚀台面, 淀积 SiO_2 , 光刻正面电极条, 正面溅射钛金电极, 背面减薄, 背面蒸发金钴镍电极, 合金, 解理, 倒装结构烧结, 压焊和封装等。

4 器件结果

基于上述分析,分别生长制备了 d 等于 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$ 的四有源区半导体激光

器,得到腔面未镀膜时器件的 $P-I$ 特性如图 4(a)所示。相应于 d 等于 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \mu\text{m}$, 器件的阈值电流分别为 180 mA 、 170 mA 和 200 mA , 在 2 A 的注入电流下的光输出功率分别为 3.72 W 、 5.02 W 和 2.79 W , 斜率分别为 2.04 W/A 、 2.74 W/A 和 1.55 W/A 。对于这三种器件,都实现了器件的内量子效率大于 1 的物理思想,并且以 d 等于 $0.5 \mu\text{m}$ 的器件特性为最优。由上述分析,对于 d 等于 $0.3 \mu\text{m}$ 的器件,尽管有源区的光限制因子较大,但由于隧道结处的光限制因子也较大,因此



与 d 等于 $0.5 \mu\text{m}$ 的器件相比,阈值电流稍高。而对于 d 等于 $0.7 \mu\text{m}$ 的器件,虽然光场在隧道结处的限制因子降低了,但相应地在光增益有源区处的光限制因子也减小了,因此阈值电流增大。另外,限制层厚度增加,使得有效的散热受到限制^[10],由图 4(a)可见,当电流约大于 1 A 时, d 等于 $0.7 \mu\text{m}$ 的器件的热饱和效应尤为明显。图 4(b)给出了当 d 等于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,器件沿垂直方向远场分布的理论模拟和实验结果,由图可见,理论和实验符合的很好,表明器件确为 TE_3 模式激励。

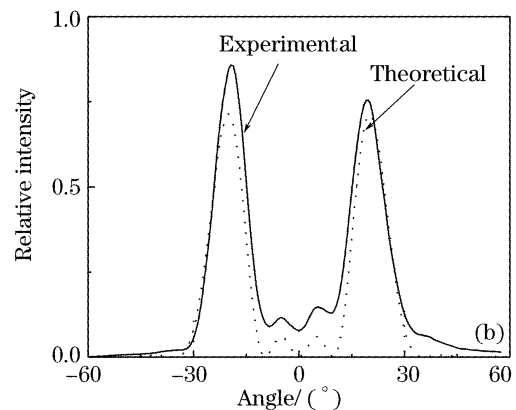


图 4 四有源区半导体激光器的 $P-I$ 特性(a)和垂直远场(b)

Fig. 4 $P-I$ characteristics (a) and vertical far field (b) of the MALD with four active regions

5 结 论

通过对四有源区半导体激光器的光波导结构进行模拟分析,得到器件的激励模式应为 TE_3 ,并指出决定于有源区和隧道处光限制因子的相对大小,存在一最佳的内限制层厚度 d 。实验结果表明, d 等于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,器件有最好的特性,腔面未镀膜时,斜率为 2.74 W/A , 2 A 下的光输出功率达 5.02 W ,且器件的激励模式确实为 TE_3 ,实验与理论相一致。为了提高多有源区半导体激光器的光输出功率,应合理设计器件的内限制层厚度。

参 考 文 献

- 1 Xiaoping Guo, Meng Chen, Gang Li *et al.*. Diode-pumped 1123-nm Nd:YAG laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 402~404
- 2 Tian Zhaoshuo, Chen Weibiao, Hu Qiquan. Study on diode laser end-pumped Yb:YAG rod laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 48~51 (in Chinese)
田兆硕,陈卫标,胡企铨. 激光二极管端面抽运的棒状 Yb:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 48~51
- 3 Sheng Guangdi, Lian Peng, Guo Xia *et al.*. Novel large coupled optical cavity semiconductor lasers and multi-active region light emitting diodes with high performances[C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4225**: 327~330
- 4 Lian Peng, Yin Tao, Gao Guo *et al.*. Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascaded via tunnel junction[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12): 2374~2377

(in Chinese)

- 廉 鹏, 殷 涛, 高 国 等. 新型多有源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器[J]. *物理学报*, 2000, **49**(12): 2374~2377
- 5 Cui Bifeng, Li Jianjun, Zou Deshu *et al.*. Large optical cavity and small vertical divergence angle semiconductor lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7): 2150~2153 (in Chinese)
崔碧峰, 李建军, 邹德恕 等. 大光腔小垂直发散角 InGaAs/GaAs/AlGaAs 半导体激光器[J]. *物理学报*, 2004, **53**(7): 2150~2153
- 6 Li Jianjun, Sheng Guangdi, Guo Weiling *et al.*. Novel semiconductor laser with dual-wavelength cascaded by tunnel junction[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(11): 961~964 (in Chinese)
李建军, 沈光地, 郭伟玲 等. 新型隧道带间级联双波长半导体激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 961~964
- 7 J. Ch. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collot *et al.*. Epitaxially stacked lasers with Esaki junctions: a bipolar cascade laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(26): 3752~3754
- 8 Li Jianjun, Chen Changhua, Lian Peng *et al.*. A numerical method for analyzing multi-transverse modes of a complex index waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 800~803
李建军, 陈昌华, 廉 鹏 等. 多横模复折射率波导的数值求解[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7): 800~803
- 9 J. T. Boyd. Theory of parametric oscillation phase matched in GaAs thin film waveguides[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, **8**(10): 788~796
- 10 Lu Pengcheng, Cui Bifeng, Li Jianjun *et al.*. Transient thermal characteristic analysis of tunnel regeneration high-power semiconductor laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 518~522 (in Chinese)
鲁鹏程, 崔碧峰, 李建军 等. 隧道再生大功率半导体激光器瞬态热特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 518~522