

隧道级联半导体激光器的光束质量因子*

崔碧峰 邹德恕 李建军 郭伟玲 鲁鹏程 刘莹 王婷 沈光地

(北京工业大学电控学院 北京市光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 运用波导模式理论和光束传输的非傍轴矢量矩理论, 对隧道级联 InGaAs/GaAs/AlGaAs 半导体激光器的光束质量进行了理论研究. 分析了隧道级联半导体激光器内限制层厚度和垂直方向光束质量因子的关系. 结果表明, 在隧道耦合距离内, 隧道结不仅起到了再生载流子的作用, 也作为无源波导拓展了光场, 减小了垂直发散角, 降低了光束质量因子. 根据模拟结果设计并制备了高光束质量, 小垂直发散角的隧道级联耦合大光腔半导体激光器, 其阈值电流密度为 $271\text{A}/\text{cm}^2$, 斜率效率为 $1.49\text{W}/\text{A}$, 垂直发散角为 17.4° , 光束质量因子为 1.11 的半导体激光器.

关键词: 隧道级联; 光束质量因子; 大光腔; 半导体激光器

PACC: 4255P; 7865P; 7450

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2004)11-1433-04

1 引言

激光光束质量是其方向性、单色性和亮度的总体描述. 1988 年 Siegman^[1] 提出了光束质量因子即 M^2 因子的概念并将其完善化后, 用 M^2 因子的概念描述光束质量已经获得了广泛应用. 国际标准化组织 1995 年正式采纳用 M^2 因子作为描述光束质量的一个定量的判据. 对光束质量很好的光束, 其 M^2 值为 1; 较好者为 1.1 左右; 若 M^2 为 1.5, 则认为光束质量较差. $M^2 > 1$, 说明光束存在像散(像差的一种), 光束偏离了高斯形, 这正是半导体激光器的情况. 由于半导体激光器在垂直和平行于结的方向有不同的像散, 因而在这两个方向有不同的 M^2 值.

光束的输出质量对各种不同类型和不同功率档次的激光器都是至关重要的, 这直接关系到激光器与光纤的耦合效率、激光与物质相互作用的效果. 对于大功率半导体激光器来说, 光束质量尤为重要. 但是半导体激光器的光束质量不如其他种类激光器高, 尤其是半导体激光器的垂直发散角方面, 由于其

角度大, 引起的像散更大, 光束质量更为恶化. 对于 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱 980nm 半导体激光器其光束质量因子 M^2 约为 $1.4^{[2]}$.

在改善半导体激光器尤其是垂直方向的光束质量方面人们做了很多工作^[3,4], 北京市光电子技术实验室提出了隧道级联 InGaAs/GaAs/AlGaAs 半导体激光器结构^[5,6], 这种结构利用隧道结的隧穿效应, 在两个有源区中间引入反向 GaAs 隧道结, 使在上一个有源区复合发光后落到价带的载流子经反向隧道结隧穿到第二个有源区的导带, 继续参与第二个有源区的发光, 使载流子得到了再生. 在这个结构中, 隧道结的基本作用是级联再生载流子. 通过合理设计波导结构, 还可以使隧道结参与波导行为, 充分拓展光场, 减小半导体激光器的垂直发散角, 提高半导体激光器的光束质量.

本文提出了大光腔的隧道级联半导体激光器的结构, 从理论上计算了光束质量因子 M^2 与波导结构中内限制层厚度的关系, 使垂直方向的光束质量因子可以下降到 1.1, 基本上达到较好的光束质量水平.

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: G20000683-02), 北京市自然科学基金(批准号: 4032007), 国家高技术研究发展计划(批准号: 2002AA312070) 及北京市教委(批准号: 2002KJ018) 资助项目

崔碧峰 女, 1972 年出生, 博士, 从事半导体激光器的研究. Email: cuibifeng@emails.bjut.edu.cn

2003-10-10 收到, 2004-01-02 定稿

©2004 中国电子学会

2 隧道级联半导体激光器器件设计结构

根据隧道级联半导体激光器的设计思想,我们设计了如图 1 所示的波导结构.在这个结构中,隧道结不仅起到了级联再生载流子的作用,还作为无源波导参与到整个波导行为中,拓展了半导体激光器的光场.其中外限制层和内限制层的 $Al_xGa_{1-x}As$ 的 Al 组分含量不一致,外限制层的 Al 组分含量低,折射率大,有利于拓展光场,并且减少波导中激射的模式.内限制层的 Al 组分含量高,折射率小,可以使光场在隧道结处迅速衰减,减小隧道结的吸收损耗.

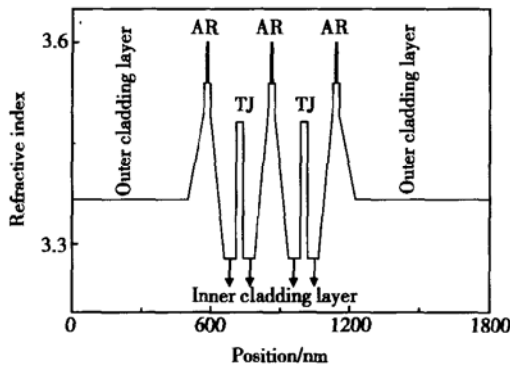


图 1 隧道级联半导体激光器波导结构图

Fig. 1 Waveguide of semiconductor laser cascaded by tunnel junction

在这种结构中,隧道结需要重掺杂,对器件带来的直接负面影响就是引起了光损耗.光损耗的主要来源就是隧道结的自由载流子吸收.为了减少这种吸收损耗,在设计隧道结时,使隧道结的 p 型和 n 型的厚度分别与耗尽层的厚度相当,使之在工作时载流子浓度降到最低.考虑在实际生长中隧道结的生长厚度和隧道结的掺杂浓度的关系以及生长难度,我们生长的隧道结的 p 型层和 n 型层的厚度分别为 6nm 和 25nm,掺杂浓度分别为 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 和 $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

模拟光场分布如图 2 所示.在模拟和实验中我们发现,内限制层的厚度是垂直发散角的敏感因素,它直接影响隧道结的耦合效果.在隧道结的耦合距离内,内限制层的厚度增大,光场拓展大,垂直发散角减小;在隧道结的耦合距离外,高阶模式激射,垂直发散角扩大.下面采用光束质量因子 M^2 来描述内限制层厚度与光束质量的关系.

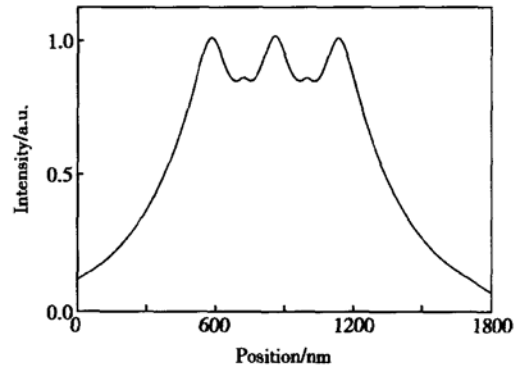


图 2 隧道级联半导体激光器近场分布图

Fig. 2 Near field pattern of semiconductor laser cascaded by tunnel junction

3 M^2 因子的获得

按照 ISO 标准^[7],条形半导体激光器如图 3 所示,光从端面出射,在任意 z 处垂直于 z 轴的平面上,在 x 和 y 这两个正交方向上束宽由 z 方向功率

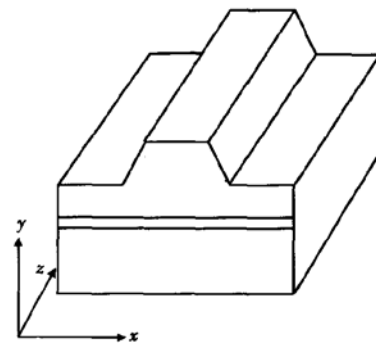


图 3 条形激光器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of strip lasers

流密度的时间平均值的二阶矩来定义,所以在垂直结方向上的光束宽度 $W_y(z)$ 为:

$$W_y^2(z) = 4 \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \bar{y})^2 \langle S_z(y, z) \rangle dy / P(0) \quad (1)$$

其中 \bar{y} 为 z 方向时间平均功率流密度在 y 方向的一阶矩; S_z 为坡印廷矢量的 z 分量; P 为光束沿 z 方向的总功率.

$$\bar{y} = \int_{-\infty}^{+\infty} y \langle S_z(y, z) \rangle dy / P(0) \quad (2)$$

$$S_z = (E \times H^*)_z \quad (3)$$

$$P = P(0) = \iint \langle S_z \rangle dx dy \quad (4)$$

以 $z = 0$ 的平面为参考面,在忽略平面波谱中非

均匀倏逝波部分的条件下, $W_y(z)$ 满足如下传输规律^[8]:

$$W_y^2(z) = W_y^2(0) + 2z \frac{W_y^2(0)}{R_y(0)} + z^2 \tan^2 \theta_y \quad (5)$$

其中垂直于结方向上的束腰 $W_y(0)$, 发散角 θ_y 和端面处波前曲率 $1/R_y(0)$ 分别由下式表示:

$$\frac{W_y^2(0)}{R_y(0)} = 4 \iint_{\Omega} \langle S_z \rangle dx dy / P \quad (6)$$

$$\tan^2 \theta_y = 4 \iint_{\Omega} \langle S_z^\infty \rangle \frac{n_x^2}{n_z^2} d\mathbf{n}_t \quad (7)$$

式中 n_x, n_z 分别为方向余弦; \mathbf{n}_t 为横向波矢; $\langle S_z^\infty \rangle$ 为远场能流密度的角分布. 根据非傍轴光束质量的定义, 垂直于结平面的光束质量因子 M^2 为:

$$M_y^2 = (\pi/\lambda) W_y(0) \tan \theta_y \quad (8)$$

半导体激光器的垂直方向可以视为纯折射率导引波导, 由于在波导端面处波前等相面与端面重合, 因此曲率项为 0, 从而束腰位于激光器出光端面, 束腰的大小就等于端面上的束宽. 同时光束中心坐标也不随 z 的变化而变化. 在模拟中, 我们取激光器的激射模式为 TE 模.

4 结果与讨论

基于图 1 所示的波导结构, 不改变各层波导的材料, 取外限制层的 Al 组分为 0.3, 内限制层的 Al 组分为 0.45, GaAs 垒层的厚度为 10nm. 经数值计算, 得出了光束质量因子 M^2 与内限制层厚度的关系, 如图 4 所示. 由图可知, 光束质量因子随内限制层的厚度而波动.

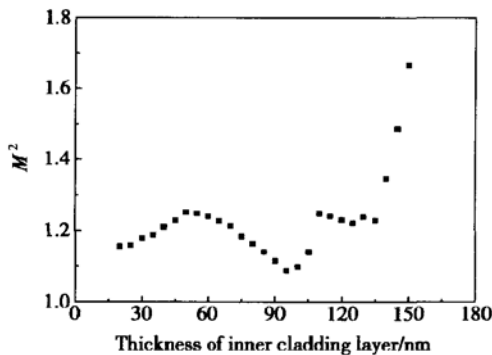


图 4 光束质量因子 M^2 与内限制层厚度关系

Fig. 4 Dependence of M^2 factor on thickness of inner cladding layer

(1) 当内限制层的厚度在 20~ 50nm 之间时, 隧道结参与波导, 抑制高阶模式激射, 只有基模激

射. 半导体激光器光场得到拓展, 垂直发散角比普通半导体激光器减小, 但是光束质量因子是由束腰和发散角联合确定的, 光束质量因子缓慢增加.

(2) 当内限制层的厚度在 50~ 95nm 之间时, 仍在隧道结的耦合距离范围内, 因而隧道结仍然参与波导行为, 垂直发散角进一步减小, 光束质量因子也减小至 1.09, 光束质量改善明显.

(3) 当内限制层的厚度在 100nm 以上时, 隧道结耦合作用减弱, 高阶模式的光限制因子逐渐大于基模的光限制因子, 出现高阶模式激射, 垂直发散角变大, 光束质量因子迅速增大, 光束质量状况恶化.

根据模拟结果, 我们设计了内限制层为 90nm 的隧道级联半导体激光器, 采用 MOCVD 设备在 GaAs 衬底上依次生长各层. 制备了 50 μ m 条形微腐蚀半导体激光器, 器件腔长 930 μ m. 驱动电流占空比为 0.2%, 其测试结果如图 5 所示. 阈值电流密度为 271A/cm², 斜率效率为 1.49W/A, 垂直发散角为 17.4°, 计算得出的 M^2 为 1.11. 在这个器件中, 隧道结不仅起了级联再生载流子的作用, 使斜率效率增大, 也作为无源波导参与了波导行为, 拓展了光场, 减小了垂直发散角和光束质量因子, 提高了光束质量.

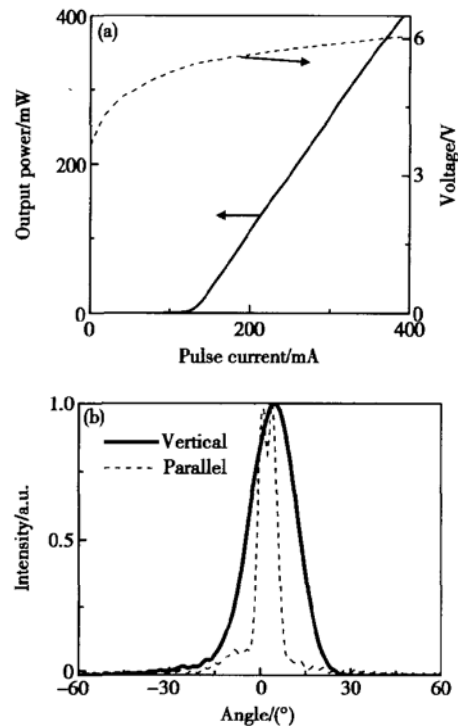


图 5 隧道级联半导体激光器测试图

Fig. 5 Measurement results of coupled tunnel cascaded semiconductor laser

5 结论

由于引入了全新的隧道再生多源区半导体激光器的机理,通过合理设计波导结构,调整内限制层的厚度和折射率的大小,可以减小半导体激光器的垂直发射角,提高光束质量;在生长中严格控制隧道结的生长厚度和掺杂浓度,减小隧道结的损耗,可以得到阈值电流密度小、斜率效率高、垂直方向光束质量好的半导体激光器。

参考文献

- [1] Siegman A E. Defining the effective radius of curvature for a nonideal optical beam. IEEE J Quantum Electron, 1991, QE27 (5): 1146
- [2] Zhu Xiaopeng, Wei Xin, Ye Xiaojun, et al. Theoretical calculation of beam quality factor M^2 of stripe semiconductor lasers. Acta Optica Sinica, 2003, 1: 45 (in Chinese) [朱晓鹏, 韦欣, 叶晓军, 等. 条形半导体激光器光束质量因子 M^2 的理论计算. 光学学报, 2003, 1: 45]
- [3] Li Shizu, Zhang Jingming, Yang Guowen, et al. GaAs/Al_xGa_{1-x}As MQWs BH laser diodes. Chinese Journal Semiconductors, 1996, 17(4): 275 (in Chinese) [李世祖, 张敬明, 杨国文, 等. GaAs/Al_xGa_{1-x}As 多量子阱掩埋条形激光器. 半导体学报, 1996, 17(4): 275]
- [4] Zhu Xiaopeng, Xu Zuntu, Zhang Jingming, et al. A single mode 980nm InGaAs/GaAs/AlGaAs large optical cavity quantum well laser with low vertical divergence angel. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(4): 342
- [5] Shen Guangdi, Lian Peng, Yin Tao, et al. Excellent performance coupled large optical cavity lasers with multi-active regions. The Fourth Chinese Optoelectronics Forum Across the Strait, Taiwan, 1999: 93
- [6] Lian Peng, Yin Tao, Gao Guo, et al. Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascaded via tunnel junction. Acta Physica Sinica, 2000, 49(12): 2374 (in Chinese) [廉鹏, 殷涛, 高国, 等. 新型多源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器. 物理学报, 2000, 49(12): 2374]
- [7] ISO/TC172/SC9/WG1, ISO/DIS11146, Terminology and test methods for lasers Revision N80, 1995
- [8] Porras M A. Non-paraxial vectorial moment theory of light beam propagation. Opt Commun, 1996, 127(1): 79

Beam Quality of Semiconductor Laser Cascaded by Tunnel Junction^{*}

Cui Bifeng, Zou Deshu, Li Jianjun, Guo Weiling, Lu Pengcheng, Liu Ying,
Wang Ting and Shen Guangdi

(Beijing University of Technology & Beijing Opto-Electronics Technology Laboratory, Beijing 100022, China)

Abstract: Based on the theory of waveguide mode and the theory of non-paraxial vectorial moment, the beam quality of TE₀ mode propagating in InGaAs/GaAs/AlGaAs semiconductor laser cascaded by tunnel junction is studied. The relation between the inner cladding layer's thickness and the quality factor of vertical beam is analyzed. The results show that the tunnel junction should not only regenerate the carriers to improve slope efficiency but also widen optical cavity to diminish M^2 and vertical divergence angle. Fabricated is a novel device with 271A/cm² of threshold current density, 1.49W/A of slope efficiency, 17.4degree of vertical divergence angle and 1.11 of beam quality factor.

Key words: tunnel cascaded; beam quality factor; large optical cavity; semiconductor laser

PACC: 4255P; 7865P; 7450

Article ID: 0253-4177(2004)11-1433-04

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China(No. G20000683-02), Natural Science Foundation of Beijing (No. 4032007) and National High Technology Research and Development Program of China(No. 2002AA312070) and Beijing Education Committee(No. 2002KJ018)

Cui Bifeng female, was born in 1972, PhD. Her research interest includes semiconductor lasers. Email: cuibifeng@emails.bjtu.edu.cn

Received 10 October 2003, revised manuscript received 2 January 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics