

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0011-03

高性能高光束质量 808 nm 锥形半导体激光器

李 辉 刘国军 曲 轶 王玉霞 李 梅 芦 鹏 乔忠良

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要 自由空间激光通信由于其具有数据传输容量大、传输路径的高度方向性、高保密性的固有优点,使其成为下一代光通信技术的发展方向之一。锥形半导体激光器是自由空间激光通信系统中最重要的光源。主要介绍 808 nm 锥形半导体激光器的外延结构设计、输出特性、光束质量等。制作的器件总腔长为 3.5 mm(脊形长度为 800 μm , 锥形区长度为 2.7 mm), 阈值电流为 750 mA, 斜率效率为 0.615 W/A, 锥形角度为 6°。利用电子束镀膜机在后腔面蒸镀 Si 和 SiO₂ 高反膜(反射率为 95%), 在前腔面蒸镀单层 SiON(反射率 < 1%)。在输出功率为 2 W 条件下, 水平发散角为 3.9°, 垂直发散角为 40°, $M^2 = 1.8$, 说明器件具有较好的光束质量。

关键词 激光器; 脊形波导; 锥形半导体激光器; M^2 因子

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0011

High Performance High Beam Quality 808 nm Tapered Semiconductor Lasers

Li Hui Liu Guojun Qu Yi Wang Yuxia Li Mei Lu Peng Qiao Zhongliang

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The free space laser communication has advantages of large data transmission amount, high direction of transmission and high transmission security. It has become one of the developing directions of next generation optical communication technologies. The tapered semiconductor lasers are the most important optical sources in the free space laser communication. In this paper, it has introduced the structure design, output characteristics and beam quality of 808 nm tapered semiconductor lasers. The total laser cavity length is 3.5 mm (tapered single emitters consist of a ridge section with a length of 800 μm and a tapered section with a length of 2.7 mm, the tapered angle is 6°). Si and SiO₂ (95% reflectivity) are deposited at the rear facet with the help of electronic beam evaporator. The front facet is coated with a single layer of SiON (<1% reflectivity). The threshold current of the device is 0.75 A. The maximum slope efficiency is 0.615 W/A. The output power of the device reaches 2 W, horizontal divergence is 3.9°, vertical divergence is 40° and M^2 factor is less than 1.8. It shows the device has good beam quality.

Key words lasers; ridged wave-guide; tapered semiconductor lasers; M^2 factor

1 引 言

自由空间激光通信由于其具有数据传输容量大、传输路径的高度方向性、高保密性等优点,使得自由空间(地面-地面, 卫星-地面, 卫星-卫星)激光通信技术成为下一代光通信技术的发展方向之一。半导体激光器由于其具有体积小、重量轻、效率高、可靠性高、可直接调制等优点,成为空间激光通信的理想光源。此外在高功率半导体激光器其他的一些应用领域,例如抽运稀土掺杂的光纤放大器、非线性频

谱学等同样需要高功率和近衍射极限的光束质量。采用单片集成主振荡功率放大器结构的锥形半导体激光器,不仅可以输出瓦级高亮度光($M^2 < 4$),而且波长范围覆盖 0.65~9 μm ^[1~8]。

现在 808 nm 锥形半导体激光器已经成为国外研究的热点。2006 年, F. Dittmar 等^[9]研制出 808 nm 锥形近衍射极限半导体激光器。器件采用 2 μm 波导厚度的大光腔结构,总腔长 2.75 mm。其中脊形区宽度 3 μm , 长度 750 μm , 器件的垂直发散角为 26°, 在

基金项目: 国家自然科学基金(60677008), 高功率半导体激光国家重点实验室基金(9140C3102060703)资助课题。

作者简介: 李 辉(1971—), 女, 助理研究员, 硕士, 主要从事半导体激光器件工艺及制作等方面的研究。

E-mail: lihui8382@126.com

4.4 W 输出功率时, M^2 因子为 1.9, 亮度达到 $460 \text{ MW/cm}^2 \text{ sr}^{-1}$ 。2007 年, Frank Dittmar 等^[10] 研制出 808 nm 脉冲输出 9 W 的超大光腔近衍射极限半导体激光器, 垂直发散角仅为 18° 。

国内在 808 nm 近衍射极限光束质量的锥形半导体激光器研究方面未见报道。只有 2005 年中国科学院半导体研究所的张洪波等^[11] 利用 MOCVD 生长了 $14 \times 10 \text{ nm}$ AlGaInAs/AlInAs/InP 应变量子阱外延片。采用带有锥形增益区脊型波导结构制作 1.2 mm 腔长的器件, 器件功率达到 500 mW, 饱和电流 3 A 以上, 峰值波长 1460 nm, 远场发散角为 $39^\circ \times 11^\circ$ 。2007 年中国科学院半导体研究所的李璟等^[12] 研制出脊形波导区和锥形区电极分离 980 nm 锥形激光器。发现电极分离的 980 nm 锥形激光器的 $P-I$ 特性曲线比较光滑, 没有明显的扭折。器件的最大功率达到 4.28 W, $M^2 = 2.45$ (输出功率为 1 W 时)。本文介绍采用带有锥形增益区脊型波导结构制作 808 nm 锥形半导体激光器, 达到 2 W 连续功率的近衍射极限输出。

2 半导体激光器的外延结构设计及生长

利用分子束外延设备生长半导体激光器材料, 外延片衬底采用 (100) 面偏向 $\langle 111 \rangle A_4^\circ$ 的 n-GaAs (Si 掺, $1 \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 低位错密度衬底 ($\leq 100 \text{ cm}^{-2}$)。结构依次为: $1.0 \mu\text{m}$ n-GaAs (Si 掺, $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 缓冲层, $0.2 \mu\text{m}$ N-Al_{0.1-0.5}Ga_{0.9-0.5}As (Si 掺, 约 $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 渐变过渡层, $1.2 \mu\text{m}$ N-Al_{0.5}Ga_{0.5}As (Si 掺, $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 下限制层, $0.1 \mu\text{m}$ 非故意掺杂 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 波导层, 7 nm 非故意掺杂 Al_{0.07}Ga_{0.93}As 量子阱层, $0.1 \mu\text{m}$ 非故意掺杂 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 波导层, $1.2 \mu\text{m}$ P-Al_{0.5}Ga_{0.5}As (Be 掺, $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上限制层, $0.3 \mu\text{m}$ P-GaAs (Be 掺, $0.1 \rightarrow 2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 欧姆接触层。材料生长过程中保持 GaAs 组分的生长速率不变, 为 $1 \mu\text{m/h}$ 。对 GaAs 的生长, V/III 束流比保持在近临界状态, 约为 8~10, 对 AlGaAs 的生长, V/III 束流比保持在 5~6。

3 锥形半导体激光器的制作

锥形半导体激光器由两部分组成: 单模低功率的主振荡激光器、锥形半导体激光放大器。锥形半导体激光器器件结构如图 1 所示, 器件的总腔长为 3.5 mm (脊形长度为 $800 \mu\text{m}$, 锥形区长度为

2.7 mm), 在脊形单模主振荡器与锥形放大器的耦合区域设计两个倾斜条形的腔破坏凹槽, 抑制器件在锥形增益区之外的电流非注入区形成的法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 腔。

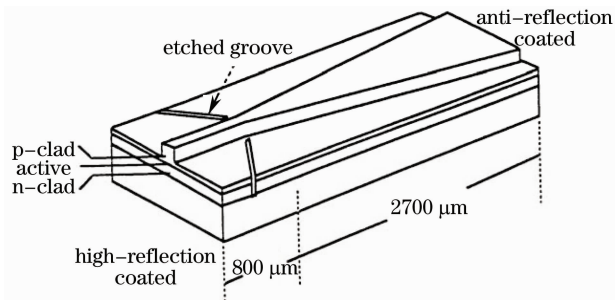


图 1 锥形半导体激光器的结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of tapered diode laser

3.1 锥形半导体激光器件制作工艺

在锥形半导体激光器的实际制作中, 锥形增益区的张角以及窄端宽度的选择主要考虑与入射光的发散角相匹配。对于条宽为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的脊形波导其出射光的衍射角为 $4^\circ \sim 6^\circ$ 。为此选择锥形增益区张角为 6° , 脊形波导区域条宽为 $5 \mu\text{m}$ 。

锥形半导体激光器制作工艺大致可以分为: 光刻与腐蚀, 非注入区 SiO_2 绝缘膜的淀积, lift-off, 溅射 p^+ 面 Ti/Pt/Au 层, 减薄, 溅射 n 面 Au, Ge/Ni 层, 金属化, 溅射 n 面 Ti/Pt/Au 层, 解理, 腔面镀膜, 单管芯解理, 焊装, 测试等步骤。首先光刻出锥形区域, 然后二次光刻出脊形部分, 脊形条宽为 $5 \mu\text{m}$, 经过 3 次光刻, 利用等离子体电感耦合 (ICP) 腐蚀出腔破坏凹槽窗口, 并利用磁控溅射在 p^+ 面溅射 100 nm Ti/100 nm Pt/200 nm Au 形成 p 型欧姆接触区, 之后外延片减薄至 $110 \mu\text{m}$, 利用磁控溅射在 n 面溅射 100 nm AuGe/100 nm Ni, 随后在氢气气氛下以 420°C 合金, 利用磁控溅射在 n 面溅射 200 nm Au, 利用划片解理机进行条解理, 利用电子束镀膜机在器件前腔面蒸镀单层 SiON (反射

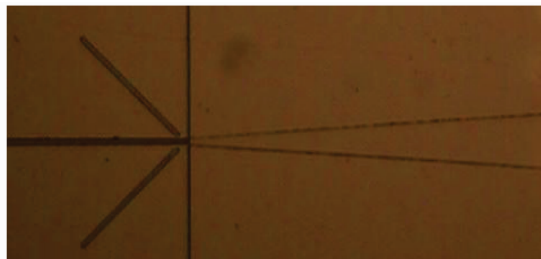


图 2 锥形半导体激光器芯片 p 面照片

Fig. 2 Photo of the p side of tapered diode laser chip

率 < 1%)，在后腔面蒸镀 Si 和 SiO₂ 高反膜(反射率为 95%)，之后解理成管芯。

3.2 锥形半导体激光器件特性

解理好的器件 p 面朝上采用 AuSn 合金焊接到 AlN 热沉上。利用安装在积分球上的经校准的探测器对输出功率与注入电流的特性进行测量。器件的远场和 P-I 特性分布如图 3,4 所示，激光器 M² 因子随输出功率变化曲线如图 5 所示。器件在室温阈值电流为 750 mA，斜率效率为 0.615 W/A，锥形角度为 6°，在输出功率为 2 W 条件下，水平发散角为 3.9°，垂直发散角为 40°，M² = 1.8，表明器件具有较好的光束质量。

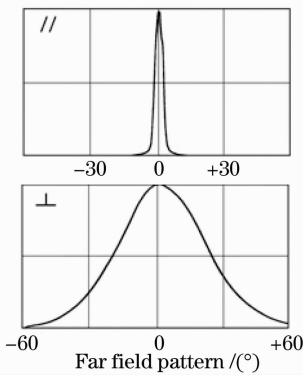


图 3 激光器的远场分布

Fig. 3 Far field of the tapered laser

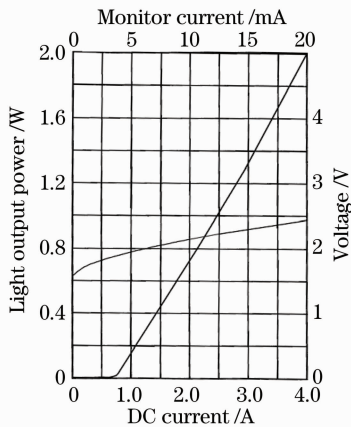


图 4 激光器的功率电流曲线

Fig. 4 Power-current curve of the tapered laser

4 结 论

采用带有锥形增益区脊型的波导结构，制作出高功率高光束质量 808 nm 锥形半导体激光器。器件在总腔长 3.5 mm(5 μm 脊形条宽，长度为 800 μm，锥形区长度为 2.7 mm)时，阈值电流为 750 mA，最大输出功率达到 2 W，斜率效率为 0.615 W/A，水平发散角为 3.9°，垂直发散角为 40°，M² 为 1.8。

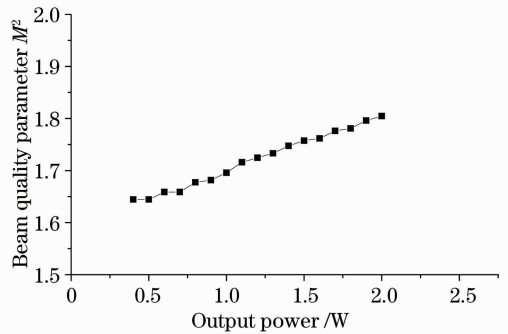


图 5 锥形半导体激光器 M² 因子随输出功率的变化曲线

Fig. 5 Curve of M² and output power of the tapered diode laser

参 考 文 献

- Bernd Sumpf, Gert Beister, Götz Erbert *et al.*. Reliable 1 W CW operation of high-brightness tapered diode lasers at 735 nm[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 984~986
- Pawel Adamiec, Bernd Sumpf, David Feise *et al.*. Twin-contact 645 nm tapered laser with 500 mW output power[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(4): 236~238
- C. Fiebig, G. Blume, C. Kaspari *et al.*. 12 W high-brightness single-frequency DBR tapered diode laser[J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(21): 1253~1255
- J. N. Walpole, Fellow, J. P. Donnelly *et al.*. Gaussian patterned contacts for improved beam stability of 1.55 μm tapered lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(3): 257~259
- S. R. Selmic, G. A. Evans, T. M. Chou *et al.*. Single frequency 1550 nm AlGaInAs-InP tapered high-power laser with a distributed Bragg reflector [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(7): 890~892
- J. N. Walpole, H. K. Choi, L. J. Missaggia *et al.*. High-power high-brightness GaInAsSb-AlGaAsSb tapered laser arrays with amorphous collimating lenses emitting at 2.05 μm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10): 1223~1225
- Lars Nähle, Julia Semmel, Wolfgang Kaiser *et al.*. Tapered quantum cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(18): 181122-1~181122-3
- Mirjam Müller, Adam Bauer, Thomas Lehnhardt *et al.*. High-power frequency stabilized GaSb DBR tapered laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(24): 2162~2164
- F. Dittmar, B. Sumpf, J. Fricke *et al.*. High-power 808 nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of M² = 1.9 at P=4.4 W[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(4): 601~603
- Frank Dittmar, Andreas Klehr, Bernd Sumpf *et al.*. 9 W output power from an 808 nm tapered diode laser in pulse mode operation with nearly diffraction-limited beam quality [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(15): 1194~1199
- Zhang Hongbo, Wei Xin, Zhu Xiaopeng *et al.*. 14xxnm quantum well lasers with tapered gain region [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 497~498
- 张洪波, 韦 欣, 朱晓鹏 等. 带有锥形增益区 14xxnm 量子阱激光器的研制 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(4): 497~498
- Li Jing, Liu Yuanyuan, Ma Xiaoyu *et al.*. High-brightness tapered diode lasers emitting at 980 nm with electrically separated ridge waveguide and tapered section [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2007, **28**(8): 1303~1305
- 李 璟, 刘媛媛, 马晓宇. 电极分离的 980 nm 锥形激光器的研制[J]. *半导体学报*, 2007, **28**(8): 1303~1305