

高功率 14xx nm 锥形增益区脊形波导 结构量子阱激光器的研制

李 璟[†] 马晓宇 王 俊

(中国科学院半导体研究所 光电子器件国家工程中心, 北京 100083)

摘要: 初步设计 14xx nm 锥形增益区脊形波导量子阱激光器材料和器件结构, 利用 MOCVD 生长 14xx nm In-GaAsP/InP 量子阱激光器外延片, 引入腔破坏凹槽(cavity-spoiling grooves)将有源层刻蚀断以隔离从锥形区反向传输回的高阶模, 进一步改善远场光束质量. 保持总腔长 1900 μm 不变, 改变脊形区的长度, 其长度分别为 450, 700 和 950 μm . 对比三种情况的最高输出功率和远场特性, 发现 $L_{\text{RW}} = 700\mu\text{m}$ 时, 器件特性参数和远场光束质量最优, 斜率效率为 0.32W/A, 饱和输出功率为 1.21W, 其远场为近衍射极限的高斯分布, 发散角为 $29^\circ \times 9.6^\circ$. 当固定脊形区长度为 700 μm , 改变锥形区长度, 发现当锥形区长度为 1000 μm 时, 器件特性参数进一步提高, 斜率效率达 0.328W/A, 饱和输出功率为 1.27W, 远场仍为近似高斯分布.

关键词: 量子阱激光器; 锥形增益; 脊形波导; 14xx nm; InGaAsP/InP

PACC: 4265J

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)01-0108-05

1 引言

随着 Internet 及其他数据业务的飞速发展, 长距离光纤传输系统对通信容量和系统扩展的需求与日俱增, 普通的掺铒光纤放大器(EDFA)的增益带宽只有约 35nm(1530~1565nm), 仅覆盖了石英单模光纤低损耗窗口的一小部分, 不能满足超长距离和大容量传输系统的需要. 光纤喇曼(Raman)放大器是基于受激喇曼散射机制的一种光放大器, 它可以放大掺铒光纤放大器所不能放大的波段, 而且增益高、串扰小、噪声指数低、频谱范围宽、温度稳定性好、总成本低.

高功率 14xx nm 激光器是光纤 Raman 放大器(RFA)的理想喇曼泵浦源. 它能够提供大功率、宽带输出, 而且动态可调谐、频率稳定性好. 为了提高系统性能, 需要制作出近衍射极限光束质量的高功率泵源.

单模高功率 14xx nm 激光器一般采用脊形波导或条形掩埋结构^[1,2], 但受条宽、腔长、腔面功率密度限制, 最高输出功率在 300mW 左右. 1993 年 Walpole 等人^[3]采用主控振荡器功率放大器(master oscillator power-amplifier, MOPA)结构制备带有锥形增益区的脊形波导激光器, 获得 980nm 4.2W 的高功率输出和近衍射极限的高质量光

束, 用于自由空间光通讯中. 此后采用锥形增益区脊形波导结构的大功率 GaAs 基激光器被多次报导^[4,5], 而 InP 基结构的长波长激光器可以输出超过 1W 的近衍射极限的光束也被多次报导^[6~9].

锥形增益区脊形波导结构激光器, 横向设计由单模区和锥形放大区两部分组成. 单模区采用脊形波导结构, 起模式过滤的作用, 保证器件基模振荡; 锥形增益区起功率放大作用, 同时可以减小输出腔面的功率密度、抑制出光面灾变性光学损伤、有效防止自聚焦和光束扭曲的发生^[10].

锥形增益区脊形波导激光器的结构要经过精确设计和优化, 才能保证较低的阈值电流、较高的输出功率、远场单模、没有自聚焦发生^[11,12], 其中主要是优化脊形区和锥形区的长度以及总腔长等. 但有关这方面研究的报道很少. 2003 年 Sumpf 等人^[11]针对 735nm 锥形激光器进行了结构优化, 对总腔长分别为 2 和 4mm, 选取最佳脊区长度分别是 750 和 1000 μm . 在长波长方面, 只有 1998 年 Walpole 等人^[12]在对 1.5 μm 锥形激光器的研究有所涉及. 本文报导了 14xx nm 锥形增益区脊形波导结构激光器的研制结果, 对 14xx nm 锥形激光器的脊形区和锥形区长度以及总腔长进行了优化.

2 材料和器件设计

初步设计材料结构并辅以理论计算. 理论计算

[†] 通信作者. Email: lij@htoe.com.cn

2006-06-15 收到, 2006-08-01 定稿

了当垒层厚度为 10nm($\lambda = 1.22\mu\text{m}$)时,有源区光场限制因子和远场垂直方向发散角随限制层($\lambda = 1.1\mu\text{m}$)厚度的变化关系.有源区光场限制因子和远场垂直方向发散角随限制层($\lambda = 1.1\mu\text{m}$)厚度的增加而线性增加.设计要求垂直方向发散角尽量小,考虑到材料生长工艺等因素,取限制层厚度为 30nm,相应的远场垂直方向的发散角为 30.4° ,光场限制因子为 2.6%.材料结构如图 1 所示.采用 MOVCD 生长 14xx nm InGaAsP/InP 应变量子阱激光器外延片.

InGaAs	0.1 μm	$p = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$
InP	1.5 μm	$p = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
InGaAsP	20nm	$\lambda = 1.1\mu\text{m}, p = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
InP	0.2 μm	$p = 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
InGaAsP	30nm	$\lambda = 1.1\mu\text{m}$
MQW	$\times 4$	$\lambda = 1.22\mu\text{m}, 10\text{nm}, 0.2\% T, \text{barrier};$ $\lambda = 1.56\mu\text{m}, 5.9\text{nm}, 0.5\% C, \text{well}$
InGaAsP	10nm	$\lambda = 1.22\mu\text{m}$
InGaAsP	30nm	$\lambda = 1.1\mu\text{m}$
InP	0.5 μm	$n = 2.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$

图 1 外延层结构

Fig.1 Thickness and component of the epitaxial layers

脊形区的台面宽度和腐蚀深度要经过理论和实验的优化,才能够保证基模振荡和器件的长期可靠性^[13,14].我们使用等效折射率方法来估计脊形波导的基模工作条件,也就是一阶侧模的截止条件.一阶侧模的截止宽度 W 为^[15]:

$$W = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_{\text{eff}2}^2 - n_{\text{eff}1}^2}} \quad (1)$$

其中 脊形波导部分的等效折射率为 $n_{\text{eff}2}$,两侧腐蚀了部分覆盖层区域的等效折射率为 $n_{\text{eff}1}$.图 2 给出了本材料结构理论计算的一阶侧模的截止宽度与剩余覆盖层厚度的变化关系.可以看出当脊形宽度为 2.5~4.2 μm 时,距有源层的剩余厚度应为 0.1~0.3 μm .当剩余覆盖层的厚度大于这个厚度时,折射率差很弱,不再具有内建折射率波导限制作用;当小于这个厚度时,将会由于较大的折射率差而使基模的截止宽度减小,导致高阶模的出现.因此结合模拟计算和实验制备情况,取脊形区宽度为 3 μm ,腐蚀深度为 1.6 μm ,剩余覆盖层的厚度为 0.2 μm ,生长 20nm 的 InGaAsP 腐蚀阻挡层.

为了保证低损耗传输,设计中锥形增益区的发散角度要小于基模衍射角,这样就可以有效避免光束传输中基模能量耦合进高阶模或辐射模,理论计算表明整个锥形角度要小于 6° ^[16,17].基模的衍射角为^[18]:

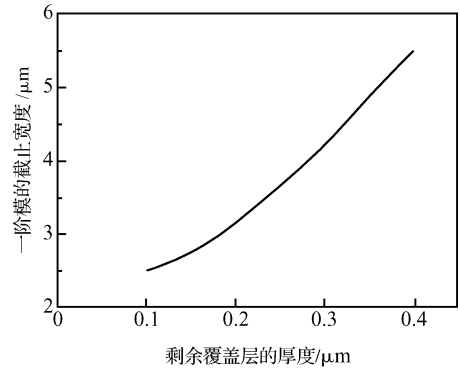


图 2 一阶模的截止宽度与剩余覆盖层厚度的关系

Fig.2 Dependence of the residual thickness of upper cladding layer on 1st mode cutoff width

$$\theta = \frac{\lambda}{nW} \left[2 \tan^{-1} \left(\frac{b}{1-b} \right)^{1/2} \times \frac{1}{\pi} \right] \quad (2)$$

$$b = \frac{n_{\text{eff}n}^2 - n^2}{n_{\text{eff}}^2 - n^2} \quad (3)$$

其中 n 为体折射率; n_{eff} 为波导宽度为 W 时的有效折射率; $n_{\text{eff}n}$ 为 $W \rightarrow \infty$ 时的有效折射率.脊形波导的宽度和脊形区的有效折射率决定脊形区的基模衍射角.根据本设计结构计算得到基模衍射角约为 6° ,因此本设计中取锥形发散区角度为 5° .

综合考虑材料均匀性、器件制备和封装工艺的可行性,本设计中器件总腔长为 1900 μm .保持腔长 $L = 1900\mu\text{m}$ 不变,改变脊形区的长度 L_{RW} 分别为 450,700 和 950 μm ,测试其 $P-I$ 特性和远场特性,从中选取最佳优化方案.

为获得较低的阈值电流和较高的斜率效率,对于脊区长度为 700 μm 的器件的锥形区长度进行了优化,改变锥形区长度分别为 800,1000 和 1200 μm ,对比其阈值电流、斜率效率、饱和功率和远场等.

为避免锥形区的高阶模反向传输回脊形区破坏基膜特性,在脊形区和锥形区之间制作了腔破坏凹槽(cavity-spoiling grooves)作为隔离,将有源层刻蚀断^[10].槽宽度为 10 μm .

3 制备工艺

生长好的外延片先光刻腐蚀出脊形波导部分,腐蚀深度为 1.6 μm ;然后再光刻腐蚀脊形波导两侧的腔破坏凹槽,深度为 2.0 μm ,将有源层腐蚀断;最后再覆盖 SiO_2 介质膜,将脊形区和锥形区上的 SiO_2 介质膜腐蚀掉.制作 p 面电极(溅射 TiPtAu)、减薄、制作 n 面电极(蒸发 AuGeNi 和合金),然后将片子解理成 Bar,用 ECR 进行腔面镀膜,HR = 95%,AR = 3%,解理后的管芯 p 面向下钎焊料烧

结在铜热沉上, TO3 封装后在激光器综合测试仪上进行测试.

4 器件特性

4.1 总腔长不变, 不同脊区长度时器件的 $P-I$ 特性

图 3 为脊形区分别为 450, 700 和 950 μm 时器件在 1% 脉冲下 (脉宽为 50 μs 、频率为 200 Hz) 测试的 $P-I$ 特性曲线. 表 1 为三种器件相应的阈值电流、斜率效率、饱和电流和最大输出功率.

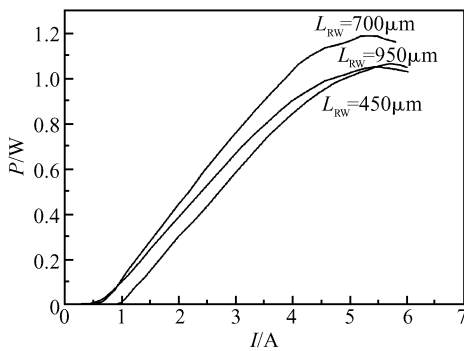


图 3 脊形波导长度分别是 450, 700 和 950 μm 时器件的 $P-I$ 特性曲线

Fig. 3 Power-current characteristics of the 14xx nm tapered laser at different lengths of RW

表 1 不同脊形区长度时器件的电光参数

Table 1 Characteristic parameters of 14xx nm tapered laser at different lengths of RW

$L_{RW}/\mu\text{m}$	I_{th}/A	$E_s/(\text{W}/\text{A})$	I_{sat}/A	$P_{max}(I_{sat})/\text{W}$
450	0.98	0.29	5.63	1.08
700	0.70	0.32	5.45	1.21
950	0.48	0.27	5.32	1.05

可以看到, L_{RW} 越短, 相应的锥形区越长, 锥形区发散越大, 阈值电流越大. 对比三者的斜率效率和输出功率, $L_{RW} = 700 \mu\text{m}$ 时, 斜率效率和最大输出功率最高, 分别是 0.30 W/A 和 1.21 W; $L_{RW} = 450 \mu\text{m}$ 时, 斜率效率和最大输出功率分别是 0.28 W/A 和 1.08 W; $L_{RW} = 950 \mu\text{m}$ 时, 斜率效率和最大输出功率最低, 分别是 0.26 W/A 和 1.05 W.

图 4~6 分别为脊形区长度是 450, 700 和 950 μm 时器件在 CW 工作下的远场图 ($I = 3\text{A}$). 其中在 $L_{RW} = 700 \mu\text{m}$ 时的水平方向远场图中, 位于中心包络的能量较多而且光斑对称性较好, 远场发散角为 $29^\circ \times 9.6^\circ$. 综合以上器件的 $P-I$ 特性和远场分布情况, $L_{RW} = 700 \mu\text{m}$ 时, 不仅斜率效率和输出功率高, 而且远场水平近似高斯分布. 图 7 是 $L_{RW} = 700 \mu\text{m}$ 时器件的光谱图 ($I = 3\text{A}$), 中心波长为 1448 nm.

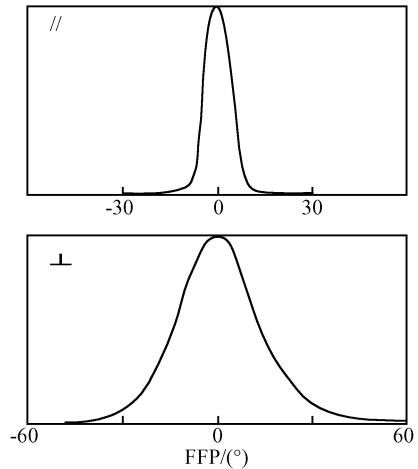


图 4 $L_{RW} = 450 \mu\text{m}$ 时器件的远场图
Fig. 4 Far-field intensity profile at $L_{RW} = 450 \mu\text{m}$

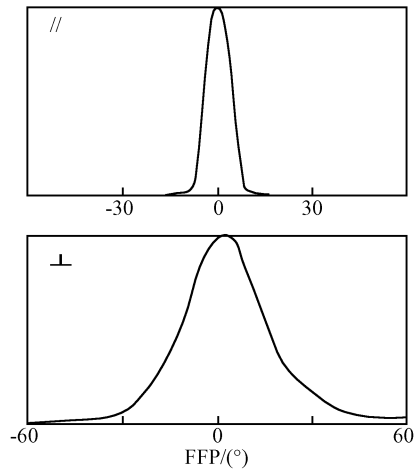


图 5 $L_{RW} = 700 \mu\text{m}$ 时器件的远场图
Fig. 5 Far-field intensity profile at $L_{RW} = 700 \mu\text{m}$

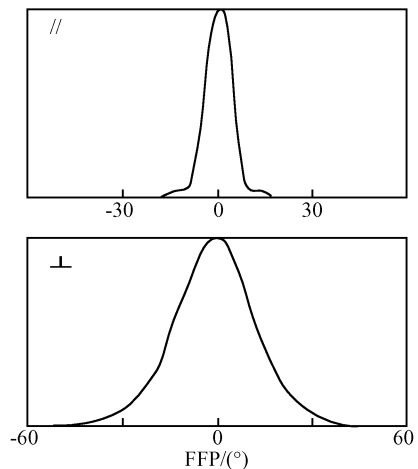


图 6 $L_{RW} = 950 \mu\text{m}$ 时器件的远场图
Fig. 6 Far-field intensity profile at $L_{RW} = 950 \mu\text{m}$

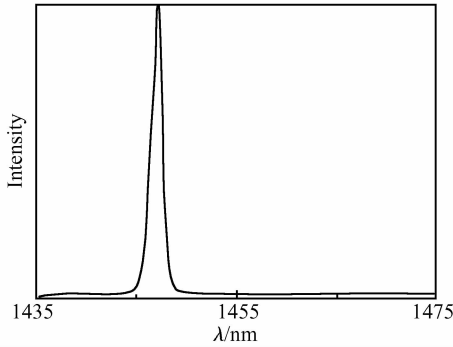
图 7 $L_{RW} = 450\mu\text{m}$ 时器件的光谱图

Fig.7 Spectrum of the 14xx nm tapered laser

4.2 脊区长度不变,不同锥形区长度时器件的阈值和效率

对固定总腔长,改变脊区长度选出的最优方案再进行腔长优化.固定脊区长度为 $700\mu\text{m}$,改变锥形区长度分别为 $800, 1000$ 和 $1200\mu\text{m}$,测试器件阈值电流和斜率效率,选出最优方案.测试结果表明,随着锥形长度的减少,阈值电流逐渐减小.图 8 是器件的斜率效率在不同锥形区长度下变化情况.随着锥形长度的减少,斜率效率逐渐增加.在三种锥形长度中,锥形区长度为 $1000\mu\text{m}$ 的器件阈值电流较低,为 0.58A ,斜率效率较高,为 0.328W/A .器件的饱和输出功率可以增加至 1.27W ,远场仍为近高斯分布,综合特性最优.而锥形长度较短为 $800\mu\text{m}$ 时,虽然阈值电流略低、斜率效率和饱和输出功率略高,但器件的水平远场特性不理想.

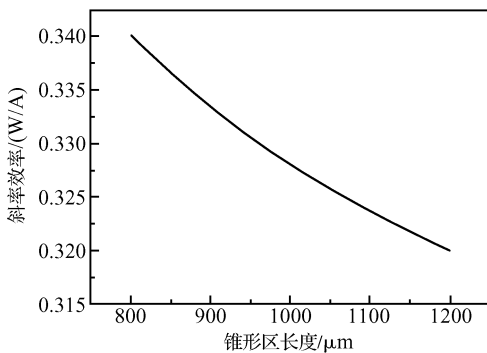


图 8 斜率效率随锥形区长度的变化关系

Fig. 8 Dependence of efficiency of slope on the length of the RW

5 分析与讨论

量子阱激光器阈值增益表示为:

$$G_{\text{th}} = \Gamma g_0 \ln \frac{J_{\text{th}}}{J_{\text{tr}}} \quad (4)$$

其中 Γ 是有源区光场限制因子; g_0 是材料增益系

数; J_{th} 是阈值电流密度; J_{tr} 是透明电流密度.

锥形增益区脊形波导结构器件的总损耗表示为^[9]:

$$\alpha_{\text{ges}} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} + \frac{1}{2L} \ln \frac{4\lambda L_{\text{taper}}}{W^2 n_{\text{eff}}} \quad (5)$$

总损耗由三部分组成:第一项为内部损耗,第二项为端面损耗,第三项是由锥形区带来的内部损耗,简称为 taper 损耗.其中 α_i 为内部损耗, L 是总腔长, $R_1 R_2$ 是前后腔反射率, L_{taper} 是锥形区长度, W 是脊宽, n_{eff} 是有效折射率.

当脊形区比较短,为 $450\mu\text{m}$ 时,在保持总腔长 $1900\mu\text{m}$ 不变时,相应的锥形区较长, taper 损耗增加,器件的总损耗增加,阈值电流密度较大,由于注入电流的面积也较大,因此阈值电流较大.由于脊形区较短,注入到锥形区的能量较少,饱和功率较低,同时模式过滤也不够充分,表现为远场水平方向光强分布不均匀.

当脊形区加长到 $700\mu\text{m}$,由于相应的锥形区的长度减小,因此 taper 损耗略有降低,器件的总损耗略降低,阈值电流密度减小,由于注入电流的面积也减小了,因此阈值电流降低.由于脊形区的延长,注入锥形区的能量增加,在锥形区的增益饱和更完全,饱和功率提高.同时模式过滤更加充分,光束更加稳定性,表现为远场近似高斯分布.

当脊形区再加长到 $950\mu\text{m}$,虽然由于锥形区的减短而使阈值电流降得更低,但脊形区的高能量注入到锥形区,由于锥形区的发散面积小,光功率密较高,容易产生光束扭曲,表现为远场水平方向单模特性不理想.

当固定脊区长度,改变锥形长度时,随着锥形长度的增加,镜面损耗和 taper 损耗都减小,器件的阈值电流密度减小了,但由于注入电流面积的增大,阈值电流仍然增加.

$$\eta_d = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m + \alpha_{\text{taper}}} \quad (6)$$

随着锥形长度的增加,镜面损耗与总损耗的比率减小了,因此外微分量子效率减小.而当锥形区长度较小,为 $800\mu\text{m}$ 时,虽然阈值电流更低、外微分量子效率更高,但由于锥形区发散面积变小,光功率密较高,容易产生光束扭曲,表现为远场单模特性不理想.

腔破坏凹槽在保证器件单模振荡中起很重要的作用,为防止从前腔面 taper 区反射回的一小部分高阶模在前后腔之间形成振荡,在脊形区和锥形区之间将有源层刻蚀断以进行有效隔离.

6 结论

腔长为 $1900\mu\text{m}$ 的锥形增益区脊形波导激光器

经过优化后, $L_{RW} = 700\mu\text{m}$, $L_{\text{taper}} = 1200\mu\text{m}$ 时器件的特性参数最好, 阈值为 0.7A , 效率为 0.32W/A , 饱和功率达 1.21W , 远场近似高斯分布. 固定脊区长度为 $700\mu\text{m}$, 改变锥形区长度, 当 $L_{\text{taper}} = 1000\mu\text{m}$ 时器件的综合特性最好, 阈值电流减小到 0.58A , 斜率效率增加到 0.328W/A , 饱和功率达 1.27W , 远场仍为近似高斯分布.

参考文献

- [1] An H, Yany S, Sun H B, et al. $1.48\text{-}\mu\text{m}$ InGaAs/InGaAsP separated confinement strained layer multiple quantum well lasers. SPIE, 1996, 2886:300
- [2] Yoshida J, Tsukiji N, Nakai A, et al. Highly reliable high-power 1480-nm pump lasers for EDFAs and Raman amplifiers. SPIE, 2001, 4285:146
- [3] Kintzer E S, Walpole J N, Chinn S R, et al. High-power strained-layer amplifiers and laser with tapered gain regions. IEEE Photonics Technol Lett, 1993, 5:605
- [4] Auzanneau S C, Calligero M, Krakowski M. High brightness GaInAs/(Al)GaAs quantum-dot tapered lasers at 980nm with high wavelength stability. Appl Phys Lett, 2004, 84:2238
- [5] Paschke K, Sumpf B, Dittmar F, et al. Nearly diffraction limited 980-nm tapered diode lasers with an output power of 7.7W. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2005, 11(5):1223
- [6] Kelemen M, Weber J, Rinner F, et al. High-brightness 1040-nm tapered diode lasers. Proc SPIE, 2002, 4947:252
- [7] Walpole J N, Betts G E, Donnelly J P, et al. High-power $1.3\text{-}\mu\text{m}$ InGaAsP/InP lasers and amplifiers with tapered gain regions. Proc SPIE, 1997, 3001:74
- [8] Cho S H, Fox S, Vusirikala V, et al. 1.05W from the mostly diffraction-limited $1.55\text{-}\mu\text{m}$ InGaAsP/InP-tapered laser. CLEO, 1998, 247
- [9] Kallenbach S, Kelemen M T, Aidam R, et al. High-power high-brightness ridge-waveguide tapered diode lasers at $14xx\text{ nm}$. Proc SPIE, 2005, 5738:406
- [10] Walpole J N. Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions. Optical and Quantum Electron, 1996, 28:623
- [11] Sumpf B, Hülsewede R, Erbert G, et al. High brightness 735nm tapered lasers-optimisation of the laser geometry. Opt Quantum Electron, 2003, 35:521
- [12] Donnelly J P, Walpole J N, Groves S H, et al. $1.5\text{-}\mu\text{m}$ tapered-gain-region lasers with high-CW output powers. IEEE Photonics Technol Lett, 1998, 10(10):1377
- [13] Wu Zhenying, Hu Changyan, Liu Zili, et al. High reliability, high power light emitting diode at $1.3\mu\text{m}$. Journal of China Institute of Communications, 1996, 17(2):121 (in Chinese) [吴振英, 胡常炎, 刘自力, 等. 高可靠性大功率 $1.3\mu\text{m}$ 发光二极管. 通信学报, 1996, 17(2):121]
- [14] Gao Feng, Wu Linzhang. Research of GaInP/AlGaInP selective wet etching in 670nm ridge waveguide laser diode. Journal of Optoelectronics • Laser, 2001, 12(9):899 (in Chinese) [高峰, 吴麟章. 脊形波导激光器中 GaInP/AlGaInP 选择蚀刻性的研究. 光电子 • 激光, 2001, 12(9):899]
- [15] Guo Changzhi. The model theory of semiconductor lasers. Beijing: Post and Telecom Press, 1989:177 (in Chinese) [郭长志. 半导体激光模式理论. 北京: 人民邮电出版社, 1989:177]
- [16] Sujecki S, Wykes J, Sewell P, et al. Optical properties of tapered laser cavities. IEE Proc Optoelectron, 2003, 150(3):246
- [17] Delépine S, Gérard F, Pinquier A, et al. How to launch 1W into single-mode fiber from a single $1.48\text{-}\mu\text{m}$ flared resonator. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2001, 7(2):111
- [18] Burns W K, Milton A F, Lee A B. Optical waveguide parabolic coupling horns. Appl Phys Lett, 1977, 30(1):28

High-Power Ridge-Waveguide Tapered Diode Lasers at $14xx\text{ nm}$

Li Jing[†], Ma Xiaoyu, and Wang Jun

(National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: High-power ridge-waveguide tapered diode lasers at $14xx\text{ nm}$ are designed theoretically. InGaAsP/InP-based diode lasers with compressively strained quantum wells and wavelengths around $14xx\text{ nm}$ are grown by MOCVD. Cavity-spoiling grooves are etched down through the active region to prevent a direct feedback path between the front and rear facets outside of the ridge region. Lasers with a total length $L = 1900\mu\text{m}$ and different ridge waveguide lengths L_{RW} are processed to study the influence of the straight section on the spatial mode filtering. The devices have optimized characteristic parameters and excellent beam quality when the ridge waveguide length is $700\mu\text{m}$ and the output power is 1.21W . Lasers with $L_{RW} = 700\mu\text{m}$ and different taper lengths L_{taper} are also processed to study the influence of the taper section on I_{th} , E_s , P_{max} , and the spatial mode filtering. The optimized devices have better characteristic parameters and excellent beam quality with a taper length of $1000\mu\text{m}$.

Key words: high-power; tapered diode lasers; ridge waveguide $14xx\text{ nm}$; InGaAsP/InP

PACC: 4265J

Article ID: 0253-4177(2007)01-0108-05

[†] Corresponding author. Email: lij@htoe.com.cn

Received 15 June 2006, revised manuscript received 1 August 2006