

# 电极分离的 980nm 锥形激光器的研制

李 璟<sup>†</sup> 刘媛媛 马晓宇

(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:** 对脊形波导区和锥形区电极分离的 980nm 锥形激光器(简称电极分离的 980nm 锥形激光器)改变脊形波导区所加电流,测试激光器的  $P-I$  特性和光束质量因子,与脊形波导区和锥形区共用电极的 980nm 锥形激光器(简称电极共用的 980nm 锥形激光器)的测量参数进行对比.发现电极分离的 980nm 锥形激光器的  $P-I$  特性曲线比较光滑,没有明显的扭折.随着脊形波导区的电流逐渐超过 150mA 以后,器件的最大输出功率逐渐达到 4.28W,与电极共用的 980nm 锥形激光器相同并趋于饱和,光束质量因子从 3.79 降到 2.45(输出功率为 1W).

**关键词:** 锥形激光器; 980nm; 电极分离; 电极共用; 光束质量因子

**PACC:** 4265J      **EEACC:** 4320J

**中图分类号:** TN248.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2007)08-1302-05

## 1 引言

高功率、高亮度的半导体激光器在许多场合有着广泛地应用,如打印、自由空间通信、固体激光器或放大器泵源、医学光动态理疗等.普通的宽条大功率半导体激光器虽然能输出瓦级功率,但通常输出的是多模激光,光束质量因子  $M^2 > 10$ .考虑到低制备成本的需要,锥形增益区脊形波导激光器(简称锥形激光器)是最有前景的器件,它不仅输出瓦级高亮度光( $M^2 < 4$ ),而且波长范围可以覆盖 735~1500nm<sup>[1~5]</sup>.近几年,Dittmar 等人<sup>[6]</sup>报道了能输出 4.4W 近衍射局限光束的 808nm 锥形激光器(腔长 2.75mm);Paschke 等人<sup>[7]</sup>报道了能输出 7.7W 近衍射局限光束的 980nm 锥形激光器(腔长 4mm);Delépine 等人<sup>[8]</sup>报道了能输出 1.3W 高亮度光的 1480nm 锥形激光器.

## 2 器件结构

锥形激光器,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<sup>[9]</sup>.图 1 为锥形增益区脊形波导结构示意图.

锥形激光器的器件结构要经过精确设计和优化,才能保证较低的阈值电流、较高的输出功率和光束质量且没有自聚焦发生<sup>[10]</sup>.我们曾经制备 980nm

锥形激光器并首次对脊形区长度进行过优化.总腔长为 1.85mm,改变脊形波导区的长度  $L_{RW}$  分别为 450,700 和 950 $\mu\text{m}$ ,脊形波导区长度为 450 $\mu\text{m}$  时器件不仅有最高的输出功率 4.28W,腔面没有灾变性光学镜面损伤(简称 COD)发生,而且具有良好的光束质量(1W 时  $M^2$  因子是 3.79).本文中,为了进一步提高光束质量,我们在国内首次研制出电极分离的 980nm 锥形激光器,将输出功率为 1W 时的  $M^2$  因子从电极共用时的 3.79 降到 2.45.图 2 为电极分离的 980nm 锥形激光器三维示意图.

## 3 器件制备和封装工艺

980nm 锥形激光器采用常规 InGaAs-AlGaAs 渐变折射率分别限制异质结单量子阱结构(GRIN-SCH SQW),具体结构如表 1 所示.采用 MOCVD 生长外延片.

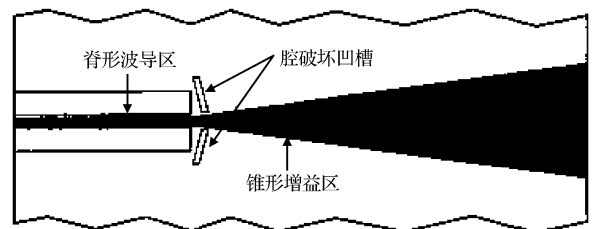


图 1 锥形增益区脊形波导结构

Fig. 1 Schematic two dimensional view of a tapered laser

<sup>†</sup> 通信作者. Email: lij@htoe.com.cn  
2007-01-08 收到,2007-03-27 定稿

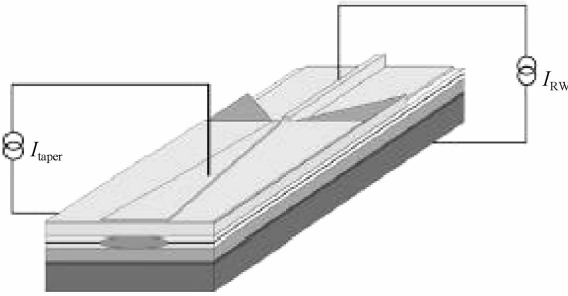


图 2 电极分离的 980nm 锥形激光器三维示意图

Fig. 2 Schematic three dimensional view of a tapered laser

为保证脊形波导区基模工作,通过计算脊形波导的一阶侧模截止宽度与剩余覆盖层厚度关系得到,剩余覆盖层厚度为  $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$  时,一阶侧模截止宽度为  $2.6\sim 3.3\mu\text{m}$ .因此结合模拟计算和实际工艺状况,设计脊形波导区宽度为  $3\mu\text{m}$ ,腐蚀深度为  $1.5\mu\text{m}$ (剩余覆盖层厚度为  $0.3\mu\text{m}$ ).

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  $6^\circ$ <sup>[11~13]</sup>.因此本设计中取锥形发散区角度为  $5^\circ$ .

为避免锥形区的高阶模反向传输回脊形波导区破坏基膜特性,在脊形波导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<sup>[9]</sup>.槽宽度为  $10\mu\text{m}$ .

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  $1850\mu\text{m}$ ,脊形区的长度为  $450\mu\text{m}$ .

器件制备和封装工艺如下:先将生长好的外延片光刻腐蚀出脊形波导部分,腐蚀深度  $1.5\mu\text{m}$ ;然后再光刻腐蚀脊形波导两侧的“腔破坏凹槽”,深度  $2.0\mu\text{m}$ ,将有源层腐蚀断;最后再覆盖  $\text{SiO}_2$  介质膜,将脊形波导区和锥形区上的  $\text{SiO}_2$  介质膜腐蚀掉.制作 p 面电极(溅射 Ti PtAu)、减薄、制作 n 面电极

表 1 外延层结构

Table 1 Thickness and component of the epitaxial layers

GaAs	$0.2\mu\text{m}$	$p = 1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$
$\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	$1.6\mu\text{m}$	$p = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	90nm	$x: 0 \rightarrow 0.35$
GaAs	20nm	barrier
$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	7.5nm	well
GaAs	20nm	barrier
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	90nm	$x: 0.35 \rightarrow 0$
$\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$	$1.6\mu\text{m}$	$n = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$
GaAs	$0.21\mu\text{m}$	$n = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$

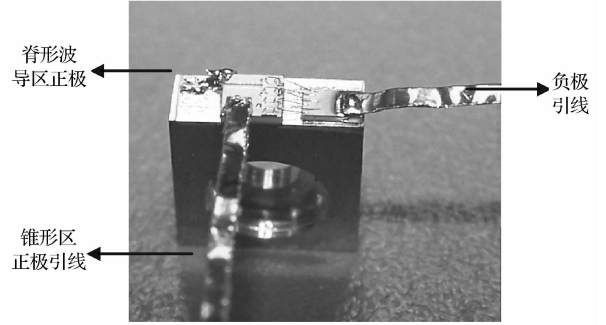


图 3 分别驱动时 980nm 锥形激光器封装图

Fig. 3 980nm tapered diode lasers with electrically separated ridge waveguide and tapered section

(蒸发 AuGeNi 和合金),然后将片子解理成条,用 ECR 进行腔面镀膜,前后腔面的反射率分别是 1% 和 95%,解理后的管芯 p 面向下用金锡焊料烧结在溅射过 TiPtAu 的 AlN 过渡热沉上,AlN 上位于脊形波导区和锥形区之间的 TiPtAu 已被刻蚀掉.将 AlN 过渡热沉再用铜焊料烧结在铜热沉上,在 AlN 的两区分别引线作为器件的两个正极,图 3 为封装图.最后在激光器综合测试仪上进行  $P-I$  和  $V-I$  测试.采用国际标准 ISO 11146 中的刀口法测试光束质量因子<sup>[14,15]</sup>.

### 4 实验结果

图 4 给出了电极共用和电极分离时 980nm 锥形激光器  $P-I$  特性曲线.电极共用激光器的  $P-I$  特性曲线是在 0.5% 的脉冲工作下 ( $50\mu\text{s}, 100\text{Hz}$ ) 测得的.电极分离激光器的脊形波导区加连续电流,锥形区加 0.5% 的脉冲电流.

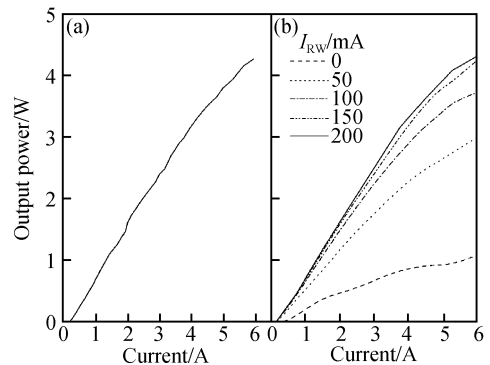


图 4 980nm 锥形激光器  $P-I$  特性曲线 (a) 电极共用;(b) 电极分离

Fig. 4 Light-current characteristics of the tapered diode laser emitting at 980nm with common (a) or separated contacts (b)

在图 4(a) 电极共用的锥形激光器的  $P-I$  特性曲线中, 当所加的最大电流为 6A 时, 锥形激光器的输出功率能达到 4.28W, 阈值电流为 0.15A, 但是曲线有多个扭折点. 在图 4(b) 电极分离的锥形激光器的  $P-I$  特性曲线中, 随着脊形波导区电流的增加, 器件的输出功率逐渐增大,  $P-I$  特性曲线比较光滑, 没有明显的扭折. 当脊形波导区电流超过 150mA 后, 最大输出功率基本与电极公用时相同, 随着脊形波导区电流的逐渐增大, 最大输出功率逐渐趋于饱和. 图 5 是电极分离的锥形激光器的输出功率随脊形波导区所加电流的变化关系.

$$\text{光束质量因子定义为: } M_{1/e}^2 = \frac{\pi\omega_{1/e}d_{1/e}}{\lambda}$$

其中  $d_{1/e}$  为光束束腰半径, 即在光传播方向上光功率降为 13.5% 和 86.5% 时所在的位置差的最小值;  $\omega_{1/e}$  为远场发散半角, 即光束双曲线渐近线夹角的一半.

我们采用国际标准 ISO 11146 中的刀口法测量电极分离的锥形激光器在不同输出功率下的光束质量因子, 与电极共用的锥形激光器的光束质量因子进行对比, 如图 6 所示, 对于电极分离的锥形激光器, 当脊形波导区电流为 150mA 时, 光束质量因子降低了很多. 输出功率为 0.5W 时,  $M^2$  因子由电极共用时的 3.65 降到 2.34; 输出功率为 1W 时,  $M^2$  因子由电极共用时的 3.79 降到 2.45. 而当脊形波导区电流增加到 250mA 时, 虽然不同功率下器件的  $M^2$  因子增大了很多, 与电极共用的锥形激光器的  $M^2$  因子接近, 但  $M^2$  因子在输出功率 2W 以后并没有急剧增加, 而是缓慢增加. 造成锥形激光器在电极共用和电极分离时的  $M^2$  因子的差异主要是由束腰宽度引起, 如: 脊区电流为 150mA 时, 输出 1W 功率时, 束腰宽度由共同驱动时的  $105\mu\text{m}$  降低到  $73\mu\text{m}$ , 远场发散半角变化不大.

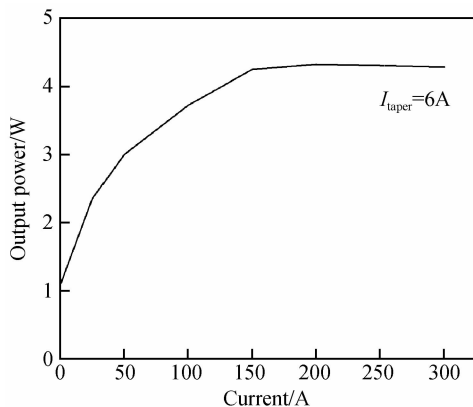


图 5 980nm 锥形激光器在不同脊区电流时的输出功率  
Fig. 5 Output power of 980nm tapered diode lasers at different  $I_{RW}$

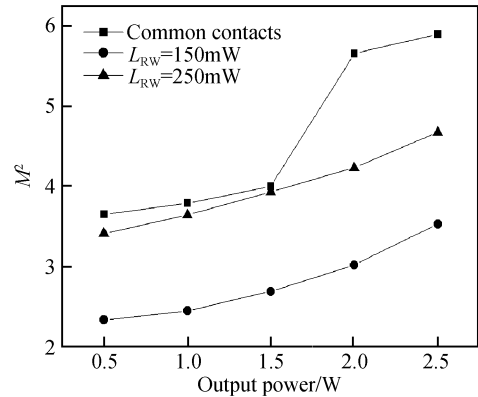


图 6 980nm 锥形激光器在不同输出功率时和不同驱动方式时的光束质量因子

Fig. 6 Dependence of the beam propagation ratio  $M^2$  on the output power for common and separate contacting

## 5 分析与讨论

为探究电极分离的 980nm 锥形激光器  $P-I$  特性曲线的线性度和光束质量提高的原因, 我们把锥形区看成一个放大器, 由脊形波导区提供空间单模光作为其输入光. 脊形波导区的光束质量决定锥形区输出的光束质量. 当脊形波导区电流为 0 时, 从放大器辐射的光主要以自发发射为主; 当脊形波导区电流逐渐增加到 150mA 以上时, 锥形放大器的增益逐渐饱和, 输出功率不再增加.

下面研究 980nm 锥形激光器中脊形波导部分的器件性质对光束质量的影响. 将 980nm 锥形激光器管芯中的脊形波导区解理下来, 前后腔面分别镀膜反射率为 1% 和 98% 的光学膜, 将管芯 p 面向下用钢焊料烧结在铜热沉上. 测试器件在连续驱动电流为 100, 150, 250mA 时的远场和光束质量因子, 发现驱动电流为 100 和 150mA 时, 远场光斑均匀对称, 测量得到  $M^2$  因子为 1.83. 而当驱动电流增加到 250mA 时,  $M^2$  因子增大到 2.72. 因此我们可以这样认为, 对于电极分离的 980nm 锥形激光器, 随着脊形波导区电流从 150mA 增大到 250mA, 脊形波导区输出光束的  $M^2$  因子从 1.83 升高到 2.72, 锥形区输入光的光束质量下降, 造成锥形放大区输出光的光束质量下降,  $M^2$  因子从 2.45 增大到 3.65.

为了更好地理解电极共用的 980nm 锥形激光器的电流分配, 我们测量了两区的电压-电流特性曲线. 当脊形波导区电流为 0 时, 测量锥形区的电压-电流关系, 得到锥形区电阻约为  $0.23\Omega$ ; 当锥形区电流为 0 时, 测量脊形波导区的电压-电流关系, 得到脊形波导区电阻约为  $1\Omega$ . 由此推算出, 对于电极共用的 980nm 锥形激光器, 约有 19% 的电流流过脊

形波导区,81%的电流流过锥形区.因此对于电极共用器件,当输出1W功率时,器件所加电流为1.5A,其中约有280mA的电流分配到脊形波导区,较大的电流激励出脊形波导区的低阶模,因此锥形区输入光的光束质量下降,表现为锥形区输出光的 $M^2$ 因子较大,为3.79.

当电极共用的980nm锥形激光器的输出功率为1.5W时,器件的 $P-I$ 特性曲线出现了明显的转折,估计与高阶模的出现有关.当输出功率为2W时 $M^2$ 因子急剧增加到5.65,此时器件的驱动电流为2.66A,估算此时流过脊形波导区的电流接近480mA,脊形波导区为多模工作.而对于分别驱动的器件, $M^2$ 因子随着输出功率的增加缓慢增加,没有出现跳跃.

电极分离的锥形激光器降低了 $M^2$ 因子,提高了光束质量.但封装工艺较复杂、散热不好.器件不能在高输出功率下连续工作.所以如何提高脊形波导区的光束质量,保证脊形波导区在较高的电流下也能基模工作是下步研究的重点.本实验在脊形波导的制备中,尽管理论计算了一阶侧模截止宽度与剩余覆盖层厚度的关系,得到了保证基模振荡的脊型波导的台面宽度和腐蚀深度,但实际制备工艺中采用湿法腐蚀,没有进行自对准工艺,下台面的宽度约为 $5\sim 6\mu\text{m}$ ,再加之氧化层的绝缘性和致密性差,造成一定的电流扩展,因此脊形波导的单模特性并不理想.

除了脊形波导区不理想的模式过滤影响光束质量外,在锥形放大区输出腔面反射回的一小部分反射波可能在脊区以外的非泵浦区形成多模振荡,尽管在脊区和锥形区之间制作了腔破坏凹槽,但凹槽的位置以及两槽之间的宽度等仍需优化.

## 6 结论

研制出了电极分离的980nm锥形激光器,测试器件在不同脊形波导区驱动电流下的 $P-I$ 特性.随着脊形波导区电流的增加,锥形激光器的输出功率逐渐增加并在脊形波导区电流超过150mA后饱

和.当输出功率为1W时,电极分离器件( $I_{\text{RW}} = 150\text{mA}$ )的 $M^2$ 因子从原来(电极共用时)的3.79降到2.45.

## 参考文献

- [1] 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
- [2] Sumpf B, Hülsewede R, Erbert G, et al. High brightness 735nm tapered lasers-optimisation of the laser geometry. Optical and Quantum Electronics, 2003, 35: 521
- [3] Kallenbach S T, Kelemen M, Aidam R, et al. High-power high-brightness ridge-waveguide tapered diode lasers at 14xxnm. Proc SPIE, 2005, 5738: 406
- [4] Walpole J N, Betts G E, Donnelly J P, et al. High-power 1.3- $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP lasers and amplifiers with tapered gain regions. Proc SPIE, 1997, 3001: 74
- [5] Cho S H, Fox S, Vusirikala V, et al. 1.05W from the mostly diffraction-limited 1.55- $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP-tapered laser. CLEO, 1998, 247
- [6] Dittmar F, Sumpf B, Fricke J, et al. High-power 808-nm tapered diode lasers with nearly diffraction-limited beam quality of  $M^2 = 1.9$  at  $P = 4.4\text{W}$ . IEEE Photonics Technol Lett, 2006, 18(4): 15
- [7] 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
- [8] Delépine S, Gérard F, Piquier A, et al. How to launch 1W into single-mode fiber from a single 1.48- $\mu\text{m}$  flared resonator. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2001, 7(2): 111
- [9] Walpole J N. Semiconductor amplifiers and lasers with tapered gain regions. Optical and Quantum Electron, 1996, 28: 623
- [10] Donnelly J P, Walpole J N, Groves S H, et al. 1.5- $\mu\text{m}$  tapered-gain-region lasers with high-CW output powers. IEEE Photonics Technol Lett, 1998, 10(10): 1377
- [11] Sujecki S, Wykes J, Sewell P. Optical properties of tapered laser cavities. IEEE Proc Optoelectron, 2003, 150(3): 246
- [12] Delépine S, Gérard F, Piquier A. How to launch 1W into single-mode fiber from a single 1.48- $\mu\text{m}$  flared resonator. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2001, 7(2): 111
- [13] Burns W K, Milton A F, Lee A B. Optical waveguide parabolic coupling horns. Appl Phys Lett, 1977, 30(1): 28
- [14] ISO standard 11146
- [15] Fundamentals of beam profiling and beam measurement. <http://www.mellesgriot.com>

## High-Brightness Tapered Diode Lasers Emitting at 980nm with Electrically Separated Ridge Waveguide and Tapered Section

Li Jing<sup>†</sup>, Liu Yuanyuan, and Ma Xiaoyu

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

**Abstract:** High-brightness tapered diode lasers emitting at 980nm with electrically separated ridge waveguide and tapered section were fabricated. The output power of the tapered section increases with the increase of the ridge waveguide current. An output power of 4.28W, which is the maximum output power with common contacting, is achieved at  $I_{RW} = 150\text{mA}$ . The power-current characteristics remain linear within the studied current range. When the output power of the tapered lasers is 1W, the beam propagation ratio decreases from 3.79 with common contacting to 2.45 with separated contacting.

**Key words:** tapered lasers; 980nm; separate contacting; beam propagation ratio

**PACC:** 4265J      **EEACC:** 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2007)08-1302-05

---

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: lij@htoe.com.cn

Received 8 January 2007, revised manuscript received 27 March 2007