

高功率 1060 nm 锥形激光器

张娜玲^{1,2}, 井红旗^{1*}, 袁庆贺^{1,2}, 吕家纲^{1,2}, 王翠鸾¹, 仲莉¹, 刘素平¹, 马晓宇^{1,2}¹中国科学院半导体研究所光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 为提高 1060 nm 锥形激光器的输出性能,对 1060 nm 锥形激光器的脊形波导区和锥形增益区长度进行了优化。当保持总腔长 3 mm 不变时,设置脊形波导区长度为 500,750,1000 μm 。在输出功率为 2 W 时,对三种情况所需的输入电流、功率-电流曲线斜率效率、电光转换效率、输出光谱及远场特性进行了对比。研究表明,当脊形波导区长度为 750 μm ,锥形增益区长度为 2250 μm 时,1060 nm 锥形激光器的输出性能最优。当输出功率为 2 W 时,所需输入电流为 3.95 A,斜率效率为 0.61 W/A,转换效率为 33.9%,光谱宽度(半峰全宽)为 0.3 nm,远场近似高斯分布且 95% 能量处的水平发散角约为 14°。

关键词 激光器; 锥形激光器; 脊形波导; 1060 nm; 输出性能

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0514002

High Power 1060 nm Tapered Laser

Zhang Naling^{1,2}, Jing Hongqi^{1*}, Yuan Qinghe^{1,2}, Lü Jiagang^{1,2}, Wang Cuiluan¹,
Zhong Li¹, Liu Suping¹, Ma Xiaoyu^{1,2}¹ National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;² College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

Abstract The lengths of the ridge waveguide (RW) region and the tapered gain region of a 1060 nm tapered laser are optimized for better output performance of such lasers. When the total length of the cavity is kept at 3 mm, the length of the ridge RW region is set to 500, 750, and 1000 μm . When the output power is 2 W, the required input currents, slope efficiencies of power-current curves, electro-optical conversion efficiencies, output spectra, and far-field characteristics of the three lasers are compared. The results show that the output performance of the 1060 nm tapered laser is best when the length of the RW region is 750 μm and that of the tapered gain region is 2250 μm . Under an output power of 2 W, the required input current is 3.95 A, the slope efficiency is 0.61 W/A, and the conversion efficiency is 33.9%, the width (full wave at half maximum) of the spectrum is 0.3 nm, the far field is approximately Gaussian distribution, and the horizontal divergence angle is about 14° at energy of 95%.

Key words lasers; tapered laser; ridge waveguide; 1060 nm; output performance

1 引言

高功率、高光束质量的半导体激光器在激光通信、工业生产等领域中具有重要的应用^[1-8]。与可见光相比,1060 nm 波段激光可以更好地穿透霾、雾和

雨,可显示舰船上的字母,也可消除某些类型的伪装。此外,1060 nm 波段激光对人眼、热像仪和夜视镜都不可见,可以较好地保持隐蔽,故其在通信及工业领域中得到了广泛的应用^[9],如将其应用于红外探测仪中。随着各应用领域对 1060 nm 波段半导

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-09; 录用日期: 2021-09-23

通信作者: *jinghq@semi.ac.cn

体激光器输出功率和光束质量的需求的提高,研究人员提出了锥形半导体激光器的设计思路。

相较传统宽条形高功率半导体激光器,锥形激光器在保证高功率输出的情况下,能获得高光束质量输出^[10-15]。锥形激光器一般由脊形波导构成的单模区和锥形增益放大区组成,脊形波导结构起模式过滤作用,锥形增益区起功率放大作用。精确设计和优化锥形半导体激光器的结构可以实现较低的阈值电流、较高的输出功率和较高的光束质量。其中,主要的优化设计为脊形波导区和锥形增益区的长度及总腔长的优化设计。目前已经有对波长为 735 nm^[16]、808 nm^[17-18] 和 14xx nm^[19] 等锥形激光器的脊形波导区和锥形增益区长度的优化报道。

本文报道了 1060 nm 锥形激光器的研制结果,探讨了脊形波导区长度和锥形增益区长度对 1060 nm 锥形激光器输出性能的影响,为 1060 nm 锥形激光器的结构设计提供了参考。

2 外延生长及器件设计制备

采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)设备进行 1060 nm InGaAs/GaAsP 量子阱激光器的外延生长,其外延结构如图 1 所示。在 GaAs 衬底上进行外延生长,先沉积厚度为 500 nm 的 GaAs 缓冲层。为了解决衬底和外延片之间的晶格失配问题,在缓冲层生产完成后,在其上沉积厚度为 160 nm 的 Al_{0-0.31}Ga_{1-0.69}As 过渡层。有源区采用 InGaAs/GaAsP 量子阱结构,该结构是单量子阱分别限制结构。整体结构采用非对称波导结构,主要是为了减少内损耗。有源层区两侧选用较薄的波导层,薄波导之外是较厚的限制层。整体结构中上下限制层分别为厚度为 1177 nm 的 Al_{0.37}Ga_{0.63}As 和厚度为 1590 nm 的 Al_{0.31}Ga_{0.69}As,起到限制载流子和光子的作用。

在外延片生长结束后,对外延片进行光刻和腐蚀以形成脊形波导区和锥形增益区。为保证脊形波导区能够处于基模工作状态,根据脊形波导结构的一阶侧模截止条件对脊形波导宽度进行了设计,一阶模截止所需脊形宽度^[20]的表达式为

$$w = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{n_2^2 - n_1^2}}, \quad (1)$$

式中: n_2 为脊形波导部分的有效折射率; n_1 为脊形波导两侧的有效折射率; λ_0 为波长。所制备的脊形波导宽度为 3 μm 。锥形角度的合理设计(锥形角度小于基模衍射角)可以保证光束从单模区低损耗传

600-nm thickness GaAs
1177-nm thickness Al _{0.37} Ga _{0.63} As confinement layer
530-nm thickness Al _{0.255} Ga _{0.745} As
10-nm thickness GaAsP
7.8-nm thickness InGaAs
10-nm thickness GaAsP
930-nm thickness Al _{0.255} Ga _{0.745} As
1590-nm thickness Al _{0.31} Ga _{0.69} As confinement layer
160-nm thickness Al _{0-0.31} Ga _{1-0.69} As transition layer
500-nm thickness GaAs buffer layer
GaAs substrate

图 1 InGaAs/GaAsP 量子阱激光器外延结构

Fig. 1 Epitaxial structure of InGaAs/GaAsP quantum well laser

输至锥形区中,且能有效避免光束传播过程中基模耦合进高阶模或辐射模。基模衍射角(θ)的定义^[21]为

$$\theta = \frac{\lambda}{nw} \left[2 \arctan \left(\frac{b}{1-b} \right)^{1/2} \frac{1}{\pi} \right], \quad (2)$$

$$b = \frac{n_3^2 - n^2}{n_2^2 - n^2}, \quad (3)$$

式中: n 为材料体折射率; n_3 为脊形宽度趋于无穷大时的有效折射率; λ 为基模波长。针对所提锥形激光器结构,设计及制备的锥形增益区锥形角为 6°。在脊形波导区和锥形增益区制备完成后,利用光刻腐蚀法制备破坏凹槽,将有源层腐蚀断。利用等离子体化学气相沉积(PECVD)设备生长厚度约为 200 nm 的 SiO₂ 介质膜,并利用光刻腐蚀法去除脊形波导区和锥形增益区上的氧化层。在腐蚀出的 P 型电极窗口处溅射上 Ti/Pt/Au,形成 P 型欧姆接触电极。将 N 面减薄至 120 μm 后,在其表面处蒸发上 Au/Ge/Ni 以构成合金,进而形成 N 型欧姆接触电极。在保持总腔长 3 mm 不变的情况下,将外延片解理成具有不同脊形波导区和锥形增益区的激光器器件。随后,进行激光器腔面镀膜操作,前腔面镀增透膜,反射率为 0.7%,后腔面镀高反膜,反射率为 98%。最后,经烧结、引线键合等工艺,将激光器管芯 P 面倒装焊封装到 AlN 过渡热沉上,同时对相关特性进行了测试。

3 器件测试与结果分析

3.1 电学特性

在锥形半导体激光器二极管封装完成后,将其放到半导体激光器综合测试仪上进行测试,控制测试温度为 23 $^{\circ}\text{C}$ 。图 2 为三种不同脊形波导区长度下锥形激光器的功率-电流(P-I)特性曲线图。可以

看出,三种锥形激光器的输出功率随注入电流线性增加。然而,具有不同脊形波导区长度的锥形激光器的 P-I 曲线的斜率效率不同。在总腔长不变的情况下,脊形波导区越短,锥形增益区越长的锥形激光器的斜率效率越高。脊形波导区长度为 500, 750, 1000 μm 的锥形激光器斜率效率分别为 0.65, 0.61, 0.57 W/A。由于具有不同脊形波导区长度的锥形激光器斜率效率不同,因此在获得相同的输出功率情况下,其所需的电流不同,脊形区越长的锥形激光器,所需的输入电流越大。

图 3 为上述三种锥形激光器的 P-I 特性曲线所对应的电光转换效率曲线。可以看出,随着输入电流的增加,三种锥形激光器的电光转换效率也在逐渐增加,并最终趋于稳定。此外,在总腔长不变的情况下,脊形区越短的锥形激光器的电光转换效率越高。当输出功率为 2 W 时,脊形波导区长度为 500, 750, 1000 μm 的锥形激光器的电光转换效率分别为 37.6%, 33.9%, 31.4%。

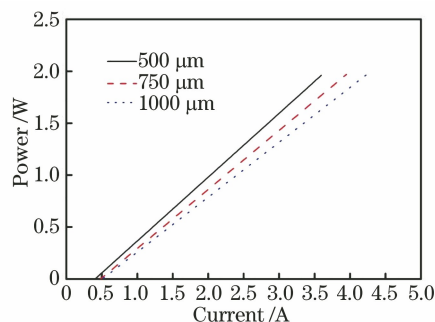


图 2 三种锥形激光器的 P-I 特性曲线

Fig. 2 P-I characteristic curves of three kinds of tapered lasers

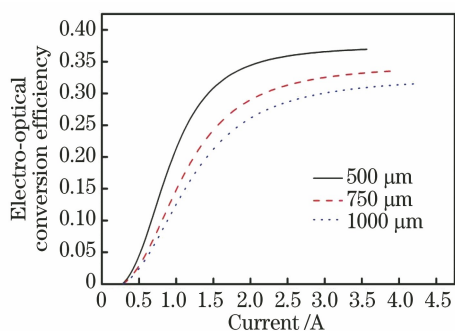


图 3 三种锥形激光器的电光转换效率

Fig. 3 Electro-optical conversion efficiency curves of three kinds of tapered lasers

当保持总腔长 3 mm 不变时,改变脊形区长度,锥形激光器会呈现出不同的电学特性。随着脊形波导区长度的增加,锥形激光器的斜率效率和电光转

换效率均逐渐降低。出现上述现象的机制是当总腔长不变时,脊形区长度变长,锥形区长度会减小。虽然脊形区长度的增加会使得注入锥形区的能量增加,但是随着锥形区的变短,其提供的功率放大增益在减小,进而整体锥形激光器的斜率效率和电光转换效率会降低。

3.2 光学特性

图 4 是三种不同脊形区长度的锥形激光器在输出功率为 2 W 时的光谱图,中心波长皆在 1060 nm 附近(分别为 1056.5, 1051.7, 1052.2 nm),中心峰的光谱宽度(半峰全宽)皆为 0.3 nm。

半导体激光器输出的光场分布用近场和远场特性来描述。近场分布系指光强在解理面上的分布,它往往和激光器的侧向模式联系在一起。远场特性是指与输出腔面有一定距离($d \gg \lambda$)的光束在空间的分布,它与光束发散角的大小有关^[22],其中 d 为光束与输出腔面的距离。图 5 是当输出功率为 2 W 时,三种不同脊形区长度锥形激光器在连续波(CW)工作下的远场图。三种锥形激光器垂直于结平面方向的发散角几乎相同,95% 能量处的垂直发散角大约为 38° ,这是因为三种器件在垂直于结平面方向的结构相同,而远场垂直发散角只与限制层、波导层及量子阱材料厚度有关^[22]。因此,当总腔长不变时,改变脊形区与锥形区的长度只会对平行于结平面的发散角有影响。由图 5 可知,当脊形区长度为 750 μm ,锥形区为 2250 μm 时,锥形激光器平行于结平面的发散角最小,95% 能量处的发散角大约为 14° ,光谱近似高斯分布,光斑对称性较好。

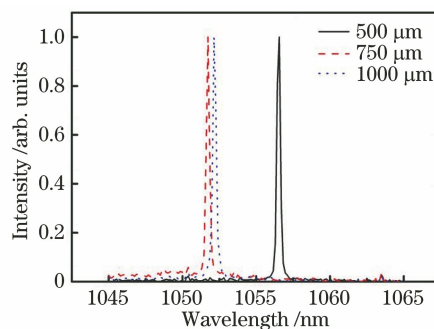


图 4 具有不同脊形波导区长度的锥形激光器的光谱

Fig. 4 Spectra of tapered laser with ridge waveguide regions of different lengths

下面研究 1060 nm 锥形激光器中脊形波导部分的器件性质对远场特性的影响。将 1060 nm 锥形激光器管芯中脊形波导区解理下来,对其 P 面倒装焊封装到 AlN 过渡热沉上,以测试器件在连续驱动电流下的远场特性。根据脊形波导区和锥形增益

区面积比可推算出:在脊形区长度为 $500\ \mu\text{m}$ 的锥形激光器中约有 0.44% 的电流流过脊形波导区;在脊形区长度为 $750\ \mu\text{m}$ 的锥形激光器中约有 0.82% 的电流流过脊形波导区;在脊形区长度为 $1000\ \mu\text{m}$ 的锥形激光器约有 1.3% 的电流流过脊形波导区。根据电流比,对解理下来的长度为 $500, 750, 1000\ \mu\text{m}$ 的脊形波导器件分别施加 $0.2, 0.3, 0.6\ \text{A}$ 的电流,并对其进行远场特性测试,测试结果如图 6 所示。可以看出, 95% 能量处的垂直发散角和图 5

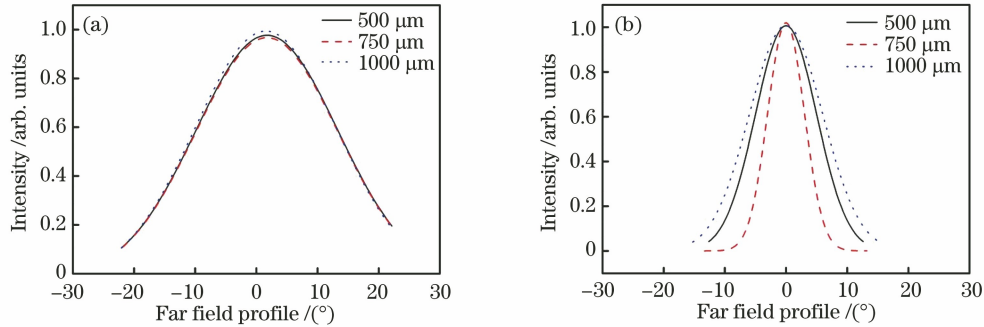


图 5 具有不同脊形波导区长度的锥形激光器的远场强度图。(a)垂直方向;(b)水平方向

Fig. 5 Far field intensity profiles of tapered laser with ridge waveguide regions of different lengths.

(a) Vertical direction; (b) horizontal direction

针对上述的实验结果,分析认为当脊形波导区长度为 $500\ \mu\text{m}$ 时,单模区长度太短,导致模式过滤不充分,进而相应锥形激光器和脊形波导器件的远场特性表现为远场水平发散角较大。当脊形波导区长度为 $750\ \mu\text{m}$ 时,模式过滤充分,光束稳定,锥形激光器和脊形波导器件的远场分布近似高斯分布,水平发散角较小。当脊形波导区长度逐渐增加到 $1000\ \mu\text{m}$ 时,相应的偏置电流也在增加,光场中出现

中的近似,但水平发散角比图 5 中的小,说明锥形激光器锥形增益部分的增加对垂直发散角没有影响,只会使得器件的水平发散角变大。在三种不同长度的脊形波导器件中,同样是腔长为 $750\ \mu\text{m}$ 时的水平发散角最小,位于中心包络的能量最大,且光斑对称性最好。该现象与脊形波导区长度为 $750\ \mu\text{m}$ 时的锥形激光器具有最优的远场特性表现出一致性,故锥形激光器的远场特性主要是由脊形波导区的性质决定的。

旁瓣甚至光丝现象,这会导致脊形波导器件的远场特性表现为远场水平发散角较大。脊形波导区长度为 $1000\ \mu\text{m}$ 的锥形激光器远场水平发散角很大是因为脊形区出现的旁瓣或光丝现象被增强。此外,此时脊形区过长,会有过高的能量注入到锥形区中,锥形区中会发生自聚焦和光束扭曲现象,从而会导致光束质量变差。

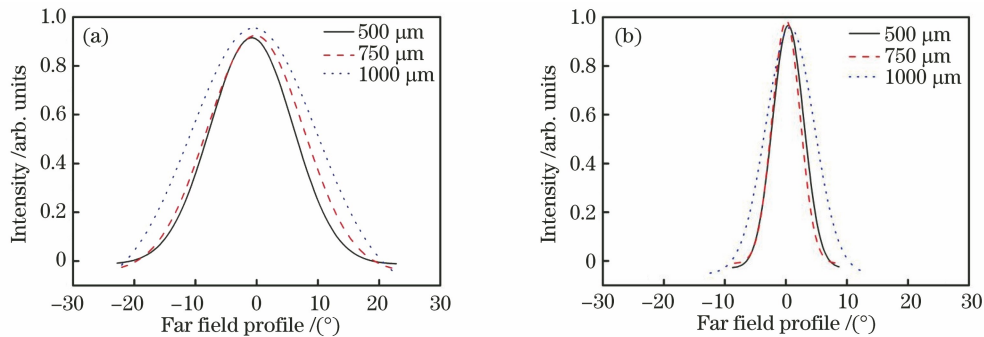


图 6 不同长度脊形波导器件的远场强度图。(a)垂直方向;(b)水平方向

Fig. 6 Far field intensity profiles of ridge waveguide devices with different lengths.

(a) Vertical direction; (b) horizontal direction

4 结 论

综合电学和光学特性,腔长为 $3000\ \mu\text{m}$ 的 $1060\ \text{nm}$ 锥形增益区脊形波导激光器经过优化后,

当脊形波导区长度为 $750\ \mu\text{m}$,锥形增益区长度为 $2250\ \mu\text{m}$ 时,器件的综合特性参数最好。当输出功率为 $2\ \text{W}$ 时,所需输入电流为 $3.95\ \text{A}$,斜率效率为 $0.61\ \text{W/A}$,转换效率为 33.9% ,光谱输出为单峰输

出且光谱宽度为 0.3 nm,远场近似高斯分布,95% 能量处的水平发散角为 14° 。

参 考 文 献

- [1] Bachmann F. Industrial applications of high power diode lasers in materials processing [J]. *Applied Surface Science*, 2003, 208/209: 125-136.
- [2] Man Y X, Zhong L, Ma X Y, et al. Characteristic analysis of 975 nm tapered lasers with separated contacts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1701005.
曼玉选, 仲莉, 马晓宇, 等. 975 nm 分离电极锥形半导体激光器特性分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1701005.
- [3] He T J, Jing H Q, Zhu L N, et al. Quantum well intermixing of 915 nm InGaAsP/GaAsP primary epitaxial wafers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0114003.
何天将, 井红旗, 朱凌妮, 等. 对 915 nm InGaAsP/GaAsP 初次外延片量子阱混杂的研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0114003.
- [4] Yuan Q H, Jing H Q, Liu S P, et al. Influence of guided wave mode on output characteristics of tapered diode laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0901001.
袁庆贺, 井红旗, 刘素平, 等. 导波模式对锥形半导体激光器输出特性的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0901001.
- [5] Sprangle P, Hafizi B, Ting A, et al. High-power lasers for directed-energy applications [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F201-F209.
- [6] Odriozola H, Tijero J M G, Esquivias I, et al. Design of 1060 nm tapered lasers with separate contacts [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2008, 40(14/15): 1123-1127.
- [7] Li J, Liu Y Y, Ma X Y. High-brightness tapered diode lasers emitting at 980 nm with electrically separated ridge waveguide and tapered section [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(8): 1302-1306.
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): 1302-1306.
- [8] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 040003.
袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 040003.
- [9] Li T, Hao E J, Li Z J, et al. Optimization of waveguide structure for high power 1060 nm diode laser[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 226-230.
李特, 郝二娟, 李再金, 等. 高功率 1060 nm 半导体激光器波导结构优化[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 226-230.
- [10] Yang Y, Liu Y, Qin L, et al. Electro-optic properties of 850 nm high-brightness tapered lasers [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(6): 593-597.
杨晔, 刘云, 秦莉, 等. 850 nm 高亮度锥形半导体激光器的光电特性[J]. *发光学报*, 2011, 32(6): 593-597.
- [11] Ma X L, Qu H W, Zhao P C, et al. 980 nm tapered lasers with photonic crystal structure for low vertical divergence[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10019: 1001907.
- [12] Sun S M, Fan J, Xu L, et al. Progress of tapered semiconductor diode lasers [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 48-58.
孙胜明, 范杰, 徐莉, 等. 锥形半导体激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 48-58.
- [13] Borruel L, Esquivias I, Garcia-Tijero J M, et al. Design and fabrication of high brightness semiconductor tapered lasers with a clarinet-like shape[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, June 12-17, 2005, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2005: 115.
- [14] 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 $P = 4.4$ W[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(4): 601-603.
- [15] Paschke K, Sumpf B, Dittmar F, et al. Nearly diffraction limited 980-nm tapered diode lasers with an output power of 7.7 W [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(5): 1223-1227.
- [16] Sumpf B, Hülsewede R, Erbert G, et al. High brightness 735 nm tapered lasers-optimisation of the laser geometry [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2003, 35(4/5): 521-532.
- [17] Jensen O B, Klehr A, Dittmar F, et al. 808 nm tapered diode lasers optimized for high output power and nearly diffraction-limited beam quality in pulse mode operation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6456: 64560A.
- [18] Borruel L, Sujecki S, Wykes J, et al. Analysis of beam quality limitations in high brightness gain guided tapered lasers [C]//Proceedings of the 4th

- International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, August 26, 2004, Santa Barbara, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004: TuB27.
- [19] Li J, Ma X Y, Wang J. High-power ridge-waveguide tapered diode lasers at 14xx nm[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(1): 108-112.
李璟, 马晓宇, 王俊. 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[J]. 半导体学报, 2007, 28(1): 108-112.
- [20] Guo C Z. Semiconductor laser mode theory [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1989.
- [21] Borrue L, Odriozola H, Tijero J M G, et al. Design strategies to increase the brightness of gain guided tapered lasers[J]. Optical and Quantum Electronics, 2008, 40(2/3/4): 175-189.
- [22] Jiang J P. Semiconductor laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2000.
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.