

# 大功率低阈值半导体激光器研究

刘梦涵 崔碧峰 何新 孔真真 李莎 黄欣竹

北京工业大学光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

**摘要** 针对大光腔结构往往导致阈值电流密度增大的矛盾,设计了一种具有较高势垒高度的三量子阱有源区。采用非对称宽波导结构的半导体激光器,该激光器在实现大光腔结构的同时保持阈值电流密度不增加。通过金属有机物化学气相沉积(MOCVD)生长 InGaAs/AlGaAs 三量子阱有源区以及 3.6  $\mu\text{m}$  超大光腔半导体激光器的外延结构。结合后期工艺,制备了 980 nm 脊形边发射半导体激光器。在未镀膜情况下,4 mm 腔长半导体激光器阈值电流为 1105.5 mA,垂直发散角为 15.6°,注入电流为 25 A 时的最大输出功率可达到 15.9 W。测试结果表明:所设计的半导体激光器在有效地拓展光场,实现大光腔结构的同时,保证了激光器具有较低的阈值电流。

**关键词** 激光器;半导体激光器;大光腔;阈值电流密度;垂直发散角

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0502001

## Study of High Power Semiconductor Laser with Low Threshold Current

Liu Menghan Cui Bifeng He Xin Kong Zhenzhen Li Sha Huang Xinzhu

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology of Ministry of Education, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China

**Abstract** In order to solve the contradiction between large optical cavity (LOC) and low threshold current, a new semiconductor laser which has three quantum wells with higher barrier and asymmetric broad waveguide structure is designed. The laser can sustain low threshold current with large optical cavity. GaAs/AlGaAs three quantum wells and 3.6  $\mu\text{m}$  super large optical cavity waveguide are grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The 980 nm semiconductor laser is fabricated. As a result, the threshold current of 4 mm LOC semiconductor laser is 1105.5 mA and the vertical divergence angle is 15.6°. An output power of 15.9 W is reached with injection current of 25 A. The results show that the designed structure is effective for light field expanding, which can realize large optical cavity and guarantee low threshold current.

**Key words** lasers; semiconductor laser; large optical cavity; threshold current density; vertical divergence angle

**OCIS codes** 140.2020; 230.5590; 230.7370; 310.1860

## 1 引言

随着半导体激光技术的发展,半导体激光器的性能得到不断提升,在众多领域逐渐取代其他激光光源,应用前景越来越广泛<sup>[1-3]</sup>。高输出功率是半导体激光器在众多领域应用的基础,然而端面灾变性烧毁(COD)严重制约了激光器输出功率的提高<sup>[4]</sup>。大光腔结构是抑制 COD 现象的有效手段,它能令光场得到拓展,增大出光面积,减小出光面的光能量密度,从而大大提高输出功率。另外,大光腔结构能够增加光斑横向尺寸,降低垂直发散角,从而改善器件的光束质量。

收稿日期: 2015-11-16; 收到修改稿日期: 2016-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(11204009)、北京市教委创新能力提升计划(TJSHG201310005001)、北京市自然科学基金(4142005)

作者简介: 刘梦涵(1991—),女,硕士研究生,主要从事大功率半导体激光器工艺方面的研究。

E-mail: 18810946399@163.com

导师简介: 崔碧峰(1972—),女,博士,副教授,主要从事半导体激光器方面的研究。

E-mail: cbf@bjut.edu.cn(通信联系人)

虽然大光腔结构在提高输出功率和改善光束特性方面有显著效果,但是光场的拓展会导致光限制因子减小<sup>[5]</sup>,从而使阈值电流密度增加。对于阈值电流较高的半导体激光器,要达到一定功率,只能提高工作电流,工作电流的增加使器件自身的发热增加,从而加重了散热的负担。

为解决大光腔与阈值电流密度之间的矛盾,国内外学者做了大量的研究。Sebastian 等<sup>[6]</sup>设计了一种大光腔窄发散角半导体激光器,波导层厚度为 1 μm 的大光腔结构半导体激光器的阈值电流密度为 135 A/cm<sup>2</sup>,垂直发散角为 27°;波导层厚度为 2 μm 的大光腔结构半导体激光器的阈值电流密度为 155 A/cm<sup>2</sup>,垂直发散角为 26°。Qiu 等<sup>[7]</sup>设计了一种低阈值电流、低垂直发散角的半导体激光器,通过在 n 型波导层添加一个远场减少层来独立控制远场发散角和光限制因子,得到的 1 mm 腔长半导体激光器的阈值电流密度在 500 A/cm<sup>2</sup> 左右,垂直发散角为 24°。李建军等<sup>[8]</sup>设计的非对称超大光腔半导体激光器,腔长为 4 mm,阈值为 0.6 A,垂直发散角为 24°。

本文以大光腔与低阈值电流并重的原则为基础,设计了一种新型的多量子阱有源区,并采用非对称宽波导结构,有效扩大光腔的同时保证阈值电流密度不增加。

## 2 器件结构

常规半导体激光器的光场分布近似为高斯分布。有源区光限制因子是有源区占光场的面积与光场总面积的比值,近场光斑横向尺寸的大小近似为光场的半峰全宽。为实现大光腔与低阈值电流并重的设计目标,设想在保证近场半峰全宽不变的同时减小半峰以上部分的宽度,这样既可以确保大光腔又可以增大光限制因子,如图 1 所示,虚线是高斯分布,实线是设想的新结构的目标光场。

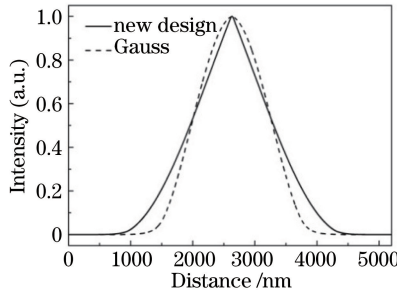


图 1 目标光场分布示意图

Fig. 1 Sketch map of target light field distribution

多量子阱半导体激光器阈值条件可原理性地表示为<sup>[9]</sup>

$$g_m(n_{th}, L_z)\Gamma(d_g) = \alpha, \quad (1)$$

式中  $g_m$  为增益系数,  $\alpha$  为损耗系数,  $\Gamma$  为光限制因子,  $n_{th}$  为阈值载流子浓度,  $L_z$  为单个量子阱宽度,  $d_g$  为有源区厚度。从(1)式可以看出,要降低阈值电流密度,应在增大光限制因子和增益的同时降低损耗。多量子阱在提高光限制因子和增益系数方面有较大的优越性,首先,多量子阱增加了有源区的厚度  $d_g$ ,使得有源区占光场的面积比例增大,从而增大了光限制因子;其次,单个量子阱的宽度小于限制电子在垂直于阱方向运动的特征尺寸,使电子波函数限制在阱内<sup>[9]</sup>,有效地增强了有源区对载流子的限制能力,提高了增益系数。以 8 nm InGaAs/15 nm GaAs 常规多量子阱结构<sup>[10]</sup>为例(图 2),计算数据显示该结构的阈值电流密度随量子阱数目的增加而明显增加。

大光腔通过增加宽波导厚度达到光场拓展的目的,进而增大光斑尺寸<sup>[11]</sup>。计算得到了文献[10]中的量子阱结构在不同 p 型波导厚度时的近场分布如图 3 所示,从图 3 可以看出,随着波导层厚度的增加,光斑横向尺寸略有增加,但是增加幅度并不大。与此同时,随着波导层厚度的增加,阈值电流密度增幅较大,这是因为随着波导层尤其是重掺杂的 p 型波导层厚度的增加, p 型空穴对光的吸收损耗增强<sup>[12]</sup>,从而导致阈值电流密度增大。对于常规的量子阱结构,通过增加波导层厚度以实现大光腔的方法效果并不明显。通过分析计算发现,在升高量子阱势垒高度的前提下,再增加波导层宽度,可以更有效地扩大光腔。设计了如图 4 所示的势垒高度较高的有源区结构,该结构在不同 p 型波导厚度条件下的近场分布如图 5 所示。由图 5 可以

看出,随着波导层厚度的增加,近场光斑的横向尺寸增幅明显。采用图 4 的量子阱结构并配合非对称宽波导,可以有效实现大光腔,同时抑制高阶模的激励<sup>[8]</sup>。

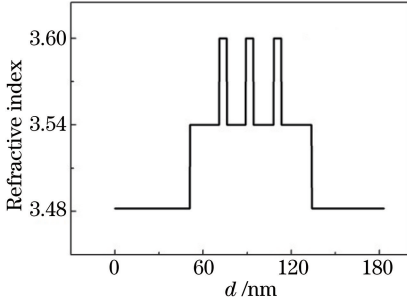


图 2 常规多量子阱有源区的折射率

Fig. 2 Refractive index of conventional multiple quantum well's active region

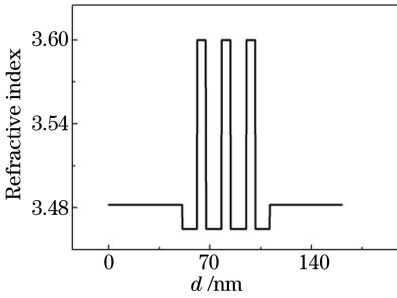


图 4 新结构有源区的折射率

Fig. 4 Refractive index of new structure's active region

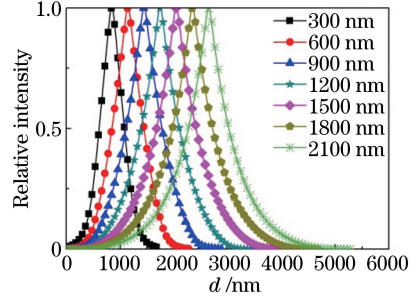


图 3 不同 p 型波导厚度的常规多量子阱结构的近场分布

Fig. 3 Near field distribution of conventional multiple quantum well with different p-waveguide thicknesses

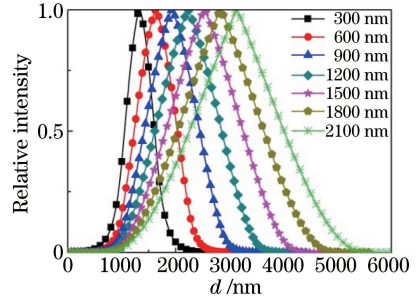


图 5 不同 p 型波导厚度的新结构的近场分布

Fig. 5 Near field distribution of new structure with different p-waveguide thicknesses

综合以上分析,采用高势垒三量子阱有源区以及非对称宽波导结构,通过进一步调整有源区、波导层以及限制层的厚度和材料组分,得到近场半峰全宽保持不变而半峰以上部分宽度减小的新结构。模拟得到新结构半导体激光器的近场分布如图 6(a)所示,垂直发散角分布如图 6(b)所示,计算得到其有源区的光限制因子为 1.24%,4 mm 腔长阈值电流密度为 214.1 A/cm<sup>2</sup>,垂直发散角为 14°。

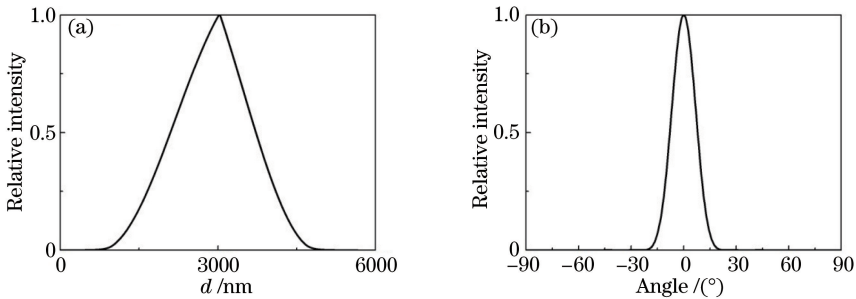


图 6 新结构半导体激光器的(a)近场分布和(b)远场分布

Fig. 6 (a) Near field distribution and (b) far field distribution of semiconductor laser with new structure

### 3 实验结果

基于以上设想,首先利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)生长外延结构。反应室压强为  $8 \times 10^3$  Pa,托盘转速为 1000 r/s,生长时的载气为经过钼管纯化的 H<sub>2</sub>,Ⅲ族源为 TMGa、TMAl 和 TMIIn,V 族源为 AsH<sub>3</sub>,n 型掺杂源为 SiH<sub>4</sub>,p 型掺杂源为 CCl<sub>4</sub>。在 GaAs 衬底上依次生长 200 nm GaAs 缓冲层(掺 Si:  $1 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>),1000 nm Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 下限制层(掺 Si:  $1 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>),1800 nm Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 下波导层(掺 Si:  $1 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>),200 nm 非掺杂 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 下波导层,三个量子阱有源区(量子阱为 7 nm InGaAs,势垒

为 10 nm  $\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ ), 200 nm 非掺杂  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  上波导层, 1400 nm  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  上波导层(掺 C:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 1000 nm  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  上限制层(掺 C:  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), 400 nm GaAs 欧姆接触层。

在生长完成的外延片上制备脊形边发射半导体激光器。首先光刻腐蚀形成  $100 \mu\text{m}$  脊形台面, 然后溅射 200 nm  $\text{SiO}_2$  并且光刻腐蚀形成  $95 \mu\text{m}$  引线孔。溅射生长 50 nm Ti/50 nm Pt/400 nm Au 的 p 型电极, 衬底减薄至  $125 \mu\text{m}$  后溅射生长 50 nm AuGeNi/300 nm Au 的 n 型电极, 合金退火后在 n 面再溅射生长  $1 \mu\text{mAu}$ 。解理成多种不同腔长的管芯进行封装和未镀膜测试。

室温下对 4 mm 腔长未镀膜半导体激光器进行光电测试, 结果如图 7 所示, 测试条件为脉冲频率 50 Hz, 占空比 0.5%。由图 7 可知, 激光器的阈值电流为 1105.5 mA,  $4 \text{ mm} \times 95 \mu\text{m}$  注入面积下阈值电流密度为  $290.9 \text{ A/cm}^2$ 。进一步测试显示, 注入电流为 25 A 时的最大输出功率为 15.9 W, 没有发生 COD 现象。激光器的光谱特性如图 8 所示, 其峰值波长为 973.2 nm, 光谱宽度为 2.8 nm。激光器的远场特性如图 9 所示, 垂直方向曲线的半峰全宽发散角为  $15.6^\circ$ , 水平方向曲线的半峰全宽发散角为  $4.2^\circ$ 。以上测试结果均表明设计以及制备的半导体激光器基本达到实验目标。

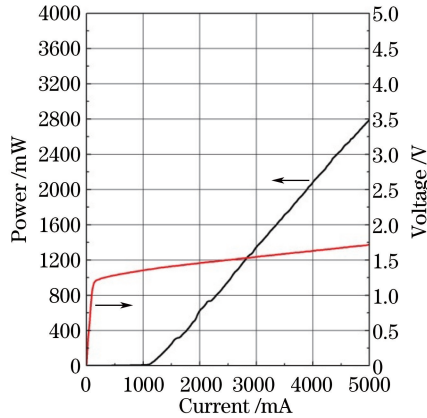


图 7 光电特性测试结果

Fig. 7 Experimental result of optical and electrical characteristics

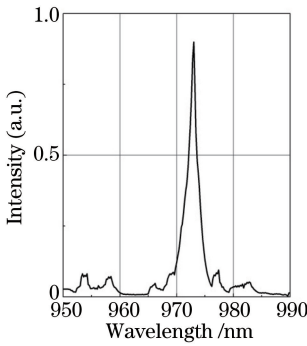


图 8 光谱特性

Fig. 8 Spectrum characteristics

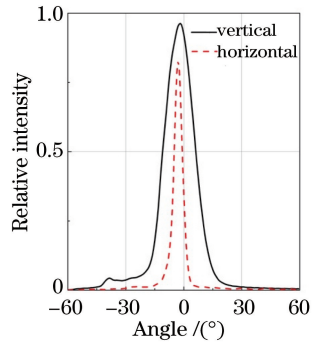


图 9 远场特性

Fig. 9 Far field characteristics

## 4 分析与讨论

基于未镀膜半导体激光器的测试结果, 垂直发散角较符合设计目标, 而且镀膜后发散角、输出功率还会进一步提高。但是, 测试得到的阈值电流密度稍高于模拟计算的结果。多量子阱半导体激光器阈值电流密度表达式如下<sup>[13]</sup>:

$$J_{th} = qn_w d_w B N_{tr}^2 \exp \left[ \frac{2}{g_n \Gamma_z} \left( \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right], \quad (2)$$

式中  $n_w$  为量子阱个数,  $d_w$  为量子阱厚度,  $B$  为双分子复合系数,  $N_{tr}$  为载流子浓度,  $g_n$  为增益系数,  $\Gamma_z$  为光限制因子,  $\alpha_i$  为腔内总损耗,  $L$  为腔长,  $R_1$  为反射率,  $R_2$  为折射率。根据(2)式可以看出, 内损耗直接影响到

阈值电流密度。为了计算内损耗,将管芯解理成 4 种腔长(分别为 700、800、1200、1500 nm)进行封装测试。内损耗与腔长的关系为

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} \left[ 1 + \frac{\alpha_i}{\ln(1/R)} L \right], \quad (3)$$

式中  $\eta_i$  为内量子效率,  $\eta_d$  为外微分量子效率。将不同腔长与对应的外微分量子效率的倒数进行线性拟合,如图 10 所示。计算得到内量子效率  $\eta_i=90.01\%$ ,内损耗  $\alpha_i=1.82 \text{ cm}^{-1}$ ,从计算结果可以看出,器件的内损耗较大,内量子效率较小。因此,过大的内损耗是导致器件阈值电流密度没有达到预期的主要原因。

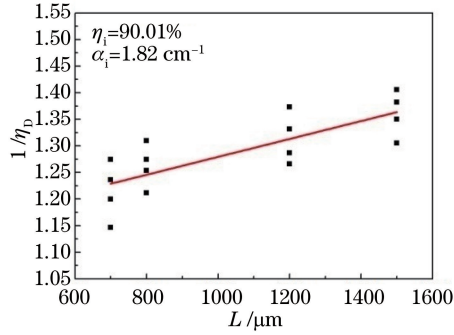


图 10 外微分量子效率的倒数与腔长的关系

Fig. 10 Relationship between cavity length and inverse external differential efficiency

半导体激光器的内损耗主要是由波导层自由载流子和杂质对光的吸收造成的。设计的波导层总厚度为  $3.6 \mu\text{m}$ ,掺杂的波导层厚度为  $3.2 \mu\text{m}$ ,掺杂的波导层部分光限制因子高达  $74.82\%$ 。而常规的大光腔半导体激光器波导层总厚度一般在  $1\sim 2 \mu\text{m}$ ,甚至更薄,而且大多数波导层是非掺杂的<sup>[6,14]</sup>。过厚的、高掺杂的波导层使自由载流子尤其是 p 型空穴、杂质对光的吸收损耗加剧,从而导致内损耗较大。

为了降低内损耗,减小阈值电流密度,未来的设计可以在三个方面做出改进:第一,镀膜后器件的各项参数都会有所提高。第二,进一步减小 p 型波导层厚度,p 型空穴的光吸收系数远远大于 n 型电子,所以 p 型波导层对光的吸收损耗更严重,在近几年的研究中甚至有研究者将 p 型波导层厚度直接减小为零。第三,降低波导层掺杂部分的比例,可以进一步设计为波导层均为非掺杂,这样既可以降低杂质对光的吸收,又可以避免杂质向有源区扩散而影响器件的可靠性。改进后的结构由于保持了波导层总厚度不变,所以垂直发散角不会改变。

## 5 结 论

设计了一种大功率小阈值电流的半导体激光器,该激光器采用量子阱势垒高度升高的三量子阱结构,同时采用非对称宽波导层结构。通过 MOCVD 生长外延以及后期工艺制作得到激光器成品,在未镀膜情况下,测得  $4 \text{ mm}$  腔长半导体激光器的阈值电流密度为  $290.9 \text{ A/cm}^2$ ,垂直发散角为  $15.6^\circ$ ,注入电流为  $25 \text{ A}$  时的输出功率可达  $15.9 \text{ W}$ 。测试结果基本达到设计目标,说明设计的新结构是合理的。

## 参 考 文 献

- 1 Pan Biwei, Yu Liqiang, Lu Dan, *et al.*. 20 kHz narrow linewidth fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502007.  
潘碧玮, 余力强, 陆丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502007.
- 2 Liu Yang, Li Lin, Qiao Zhongliang, *et al.*. Optical characteristics of  $1.06 \mu\text{m}$  InGaAs/GaAs quantum well grown by MOCVD[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1106001.  
刘洋, 李林, 乔忠良, 等. MOCVD 生长  $1.06 \mu\text{m}$  波段 InGaAs/GaAs 单量子阱材料的发光特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1106001.
- 3 Liu Yun, Zhao Shanghong, Yang Shengsheng, *et al.*. Study on space radiation effects of laser diodes based on Poisson process[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002002.

- 刘 韵, 赵尚宏, 杨生胜, 等. 基于泊松过程的半导体激光器空间辐射效应研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002002.
- 4 Zheng Xiaogang, Li Te, Lu Peng, *et al.*. Analysis of temperature characteristics of 980 nm semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102004.  
郑晓刚, 李 特, 芦 鹏, 等. 980 nm 半导体激光器腔面温度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102004.
- 5 Yu Haiying, Cui Bifeng, Chen Yixin, *et al.*. A novel semiconductor laser diode with large cavity for high efficiency coupling with the optical fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(7): 3945-3949.  
于海鹰, 崔碧峰, 陈依新, 等. 一种与光纤高效耦合的新型大光腔大功率半导体激光器[J]. 物理学报, 2007, 56(7): 3945-3949.
- 6 Sebastian J, Beister G, Bugge F, *et al.*. High-power 810-nm GaAsP-AlGaAs diode lasers with narrow beam divergence[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001, 7(2): 334-339.
- 7 Qiu B C, Kowalski O P, Mcdougall S, *et al.*. High-performance red lasers with low beam divergence[J]. IEEE Photonics Journal, 2009, 1(3): 172-177.
- 8 Li Jianjun, Cui bifeng, Deng Jun, *et al.*. 980 nm high power semiconductor laser with asymmetric supper large optical cavity[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102011.  
李建军, 崔碧峰, 邓 军, 等. 非对称超大光腔 980 nm 大功率半导体激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102011.
- 9 Huang Dexiu. Semiconductor optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 195.  
黄德修. 半导体光电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 195.
- 10 Yu Bo, Gai Hongxing, Han Jun, *et al.*. Optimization of MOCVD-growth strain InGaAs/GaAs quantum well and its application for 980 nm LD[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(1): 81-84.  
俞 波, 盖红星, 韩 军, 等. 应变 InGaAs/GaAs 量子阱 MOCVD 生长优化及其在 980 nm 半导体激光器中的应用[J]. 量子电子学报, 2005, 22(1): 81-84.
- 11 Lichtenstein N, Winterhoff R, Scholz F, *et al.*. The impact of LOC-structures on 670 nm (Al)GaInP high-power lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(4): 564-570.
- 12 Chong Feng, Wang Jun, Xiong Cong, *et al.*. Optimum the thickness of p-waveguide layer for high conversion efficiency diode lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 39(12): 3419-423.  
崇 锋, 王 俊, 熊 聪, 等. 优化 p 型波导层厚度提高半导体激光器电光转换效率[J]. 光学学报, 2009, 39(12): 3419-3423.
- 13 Zhang Xiangwei. Polarization control of high-power vertical-cavity surface-emitting lasers[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 61-62.  
张祥伟. 高功率垂直腔面发射激光器的偏振控制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013: 61-62.
- 14 Wiedmann N, Jandeleit J, Mikulla M, *et al.*. Improved high-temperature operation of InGaAs/AlGaAs LOC SQW diode lasers by incorporation of short-period superlattice quantum-well barriers[C]. SPIE, 2001, 4283: 247-255.