

大功率半导体激光器性能改善的研究

孔真真, 崔碧峰, 黄欣竹, 李莎, 房天啸, 郝帅

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 电流的侧向限制对半导体激光器具有重要意义, 在半导体激光器有源区加入侧向限制结构一方面可以实现侧向限制, 另一方面可以在一定范围内降低阈值电流密度。但是常规的侧向限制方法无论是侧向波导结构还是浅隔离槽结构都无法高效地抑制电流的侧向扩展。设计了新型的深隔离槽结构, 利用 Comsol 软件仿真模拟侧向限制, 发现深度超过外延层厚度的深隔离槽结构能更有效地提高电流的注入效率。在工艺中利用感应耦合等离子体刻蚀在距离脊型台两侧 $100\ \mu\text{m}$ 的位置刻蚀深度为 $4\ \mu\text{m}$ 的深隔离槽。实验结果表明, 工作电流为 $5\ \text{A}$ 时, 腔长 $4\ \text{mm}$ 具有深隔离槽结构的半导体激光器芯片输出功率为 $3.6\ \text{W}$, 阈值电流为 $0.3\ \text{A}$, 阈值电流密度为 $78.95\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。结果表明新型深隔离槽结构可以有效抑制电流的侧向扩展。

关键词 激光器; 大功率半导体激光器; 侧向限制; Comsol 仿真; 低阈值电流密度

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.071403

Study on Performance Improvement of High Power Semiconductor Lasers

Kong Zhenzhen, Cui Bifeng, Huang Xinzhu, Li Sha, Fang Tianxiao, Hao Shuai

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

Abstract Lateral confinement of the current is significant to semiconductor lasers. Lateral confinement can be achieved and threshold current density can be decreased in certain range if lateral confinement structure is embedded in active region of semiconductor lasers. But conventional lateral confinement method cannot suppress the lateral spread current effectively no matter whether lateral waveguide structure or shallow isolation groove is adopted. A new type of deep isolation groove structure is proposed, and lateral confinement is stimulated based on Comsol software. The deep isolation groove structure with etching depth more than the thickness of epitaxial layer is more effective when enhancing current injection efficiency. Two deep isolation grooves of $4\ \mu\text{m}$ depth located at $100\ \mu\text{m}$ away from the ridge type at both sides are etched by inductively coupled plasma etching. Experimental results show that, given the current of $5\ \text{A}$, the output power of semiconductor laser chip with cavity length of $4\ \text{mm}$ and deep isolation groove is $3.6\ \text{W}$. The threshold current is $0.3\ \text{A}$. The threshold current density is $78.95\ \text{A}/\text{cm}^2$. It indicates that the new type of deep isolation groove structure can suppress the lateral spread of the current effectively.

Key words lasers; high power semiconductor lasers; lateral confinement; Comsol simulation; low threshold current density

OCIS codes 140.5960; 140.3460; 220.4000

收稿日期: 2017-02-12; **收到修改稿日期:** 2017-03-10

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

作者简介: 孔真真(1990—), 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: jkongzhenzhen@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

1 引言

半导体激光器是一种体积小、结构简单、价格便宜的新型光学器件。自出现以来,半导体激光器在光通信、互联网、信息存储、激光加工、激光显示、成像、检测、医疗诊断、激光武器等诸多领域引发技术变革,带动了相关产业跨越式发展,形成了新的高新技术产业群,取得了巨大的经济和社会效益^[1]。

与其他激光器不同,半导体激光器的谐振腔中反射镜不是外加的,而是利用半导体本身晶体的解理面形成,这使得半导体激光器具有体积小、结构紧凑等优点,避免了机械不稳定性。由于半导体激光器中存在非辐射复合以及光学变性损伤等因素,其受温度影响明显,因此减少热损耗,尽可能降低阈值电流密度成为研制半导体激光器所追求的重要指标^[2]。最早的双异质结激光器以自然解理面作为反射镜,衬底、有源区、电极接触各层面积相等,有源层在侧向对注入的载流子和激发的光子没有限制,需要较大的注入电流并且会产生很高的热负载,同时光束质量和模式特性也不理想^[3]。因此,需要引入侧向限制结构。各种限制结构对注入电流的侧向扩展的限制能力各不相同,但均无法完全限制电流侧向扩展^[4]。电流注入后,在流入有源区的过程中不可避免地会发生一定程度的侧向扩展,同时注入到有源区的载流子也会发生侧向扩展,使得有源区在相同受激发射电流强度的情况下,需要注入更多电流以弥补侧向扩展所引起的损失,阈值电流密度变大,注入效率降低。半导体激光器中扩展到非注入区的电流对器件的光功率没有贡献,使得会以热的形式耗散掉,这些多余的热量会对激光器的寿命以及可靠性产生非常不利的影响^[5]。

本文提出一种刻蚀深隔离槽的侧向限制方法,在脊型台两侧距离 100 μm 的位置利用感应耦合等离子体刻蚀(ICP)方法,以 400 nm 的二氧化硅为掩膜刻蚀两条宽 20 μm 、深 4 μm 的侧向限制沟槽,并利用 Comsol 软件模拟电力在有源区的扩展情况。由于隔离槽深度已经超过整个外延层,隔离层覆盖绝缘层,因此有源区在隔离槽处的电流扩展被完全阻断。仿真和实验结果均证明,引入深隔离槽可以有效减小器件阈值电流,提高注入效率。

2 理论分析

2.1 基本结构

实验采用激射波长为 980 nm 的近红外大功率半导体激光器,所采用的激光器条宽 100 μm ,周期 500 μm ,腔长 4000 μm ^[6]。其外延结构如表 1 所示。

表 1 半导体激光器的外延结构

Table 1 Epitaxial structures of semiconductor laser

Layer	Material	Thickness /nm	Doping concentration / cm^{-1}
Cap	GaAs	300	C: 3×10^{19}
p-graded	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(x: 0.3-0.06)$	100	C: 1×10^{18}
p-cladding	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	600	C: 1×10^{18}
Waveguide	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	850	—
Quantum-well	$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	7	—
Barrier	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	100	—
Quantum-well	$\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$	7	—
Waveguide	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	1150	—
n-cladding	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	600	Si: 1×10^{18}
n-graded	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(x: 0.06-0.3)$	100	Si: 1×10^{18}
Buffer	GaAs	300	Si: 1×10^{18}
Substrate	GaAs		

2.2 电流扩展理论

电流扩展直接影响有源区对注入电流的有效利用率,进而影响器件的阈值电流、斜率效率和输出功率。如图 1 所示,半导体激光器的总电流 J_T 分为 J_A 和 J_P 两部分, J_T 可表示为

$$J_T = J_A + 2J_P, \quad (1)$$

式中 J_A 为正对电极流入有源区的电流, J_P 为流入无源区 ($|y| > w/2$) 的电流,可表示为

$$J_P = [(2L \cdot J_A) / (\beta_V R \cdot w)]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 L 和 w 分别为接触电极的条长和条宽, R 为方块电阻, $\beta_V = e / \eta k_B T$, η 为从 1 到 2 的常数,对 III-V 族

半导体而言 η 可取为 2, e 为电子电量, T 为绝对温度, k_B 为玻耳兹曼常数^[7]。理论上, 电流扩展广泛存在, 为了使电流能够更有效地被利用, 更多地集聚在有源区, 在制作工艺中引入深隔离槽, 在隔离槽处切断流入无缘区的电流 J_P , 从而抑制电流的横向扩展。同时, 使电流更多地以 J_A 的形式流入有源区, 如图 1 所示, 图中实线的疏密表征注入电流的大小。

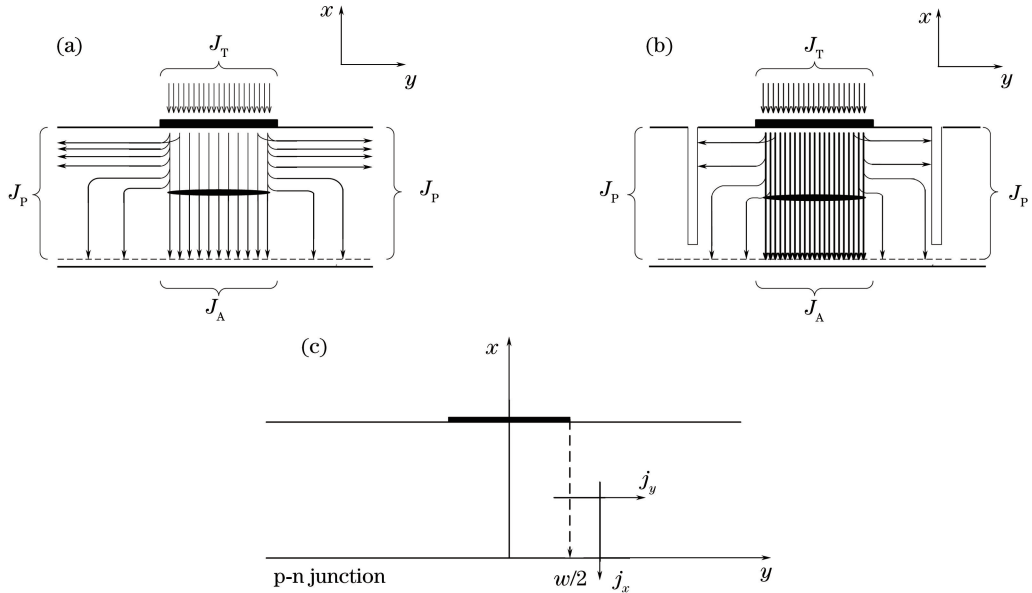


图 1 半导体激光器侧向电流分布。(a) 无隔离槽; (b) 有隔离槽; (c) 相应的坐标系

Fig. 1 Lateral current distributions in the semiconductor lasers.

(a) Without isolation groove; (b) with isolation groove; (c) corresponding coordinate system

由图 1 可知, 电流注入有源区的部分 J_A 的电流密度在接触电极的条宽范围内分布均匀。理论上隔离槽越深越能够有效减弱侧向电流扩展, 如图 2 所示。因此, 当侧向刻蚀深度超过外延层后, 在隔离槽位置处有源区电流不会扩展出去, 原本扩展到沟槽外部的扩展电流将被限制于两个沟槽之间。在同样的外部电流注入条件下, 中间受激发射区的有源区电流密度将会变大, 使得在同样的阈值电流密度激射时, 有隔离槽结构的器件阈值电流比较低。

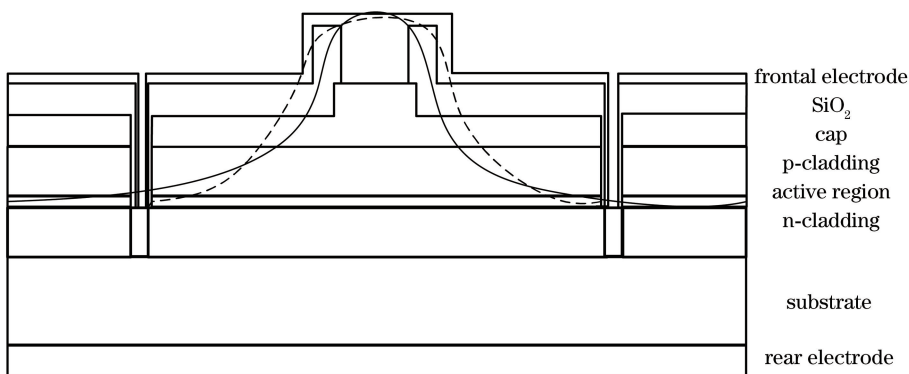


图 2 电流在芯片中侧向分布剖面图

Fig. 2 Cross-section schematic of lateral distribution of current in chip

2.3 电流模拟

由图 2 可知, 理论上引入深隔离槽可以使电流更多地分布在有源区。为了验证实验设计, 利用 Comsol 软件分别模拟有隔离槽和无隔离槽两种结构在半导体激光器中的电流分布。假设电阻率在器件每一层中是均匀分布的, 利用 Comsol 软件中的半导体模型, 输入每一层半导体材料的电导率和相对介电常数, 然后进行网格划分。为了模拟时更容易划分网格, 将被模拟器件的腔长设为 $400 \mu\text{m}$, 网格划分结束后, 在正面电极

注入 1 A 的电流,注入电流密度为 $2.5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ($2.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$),并将背面电极做接地处理,最后模拟结果。图 3 所示的是在有源区的脊型台附近电流扩展的局部放大图,旁边图例标示了不同颜色所对应的电流密度。由图 3 可知,有深隔离槽的电流沿脊型台边缘扩展距离明显小于没有隔离槽的器件。

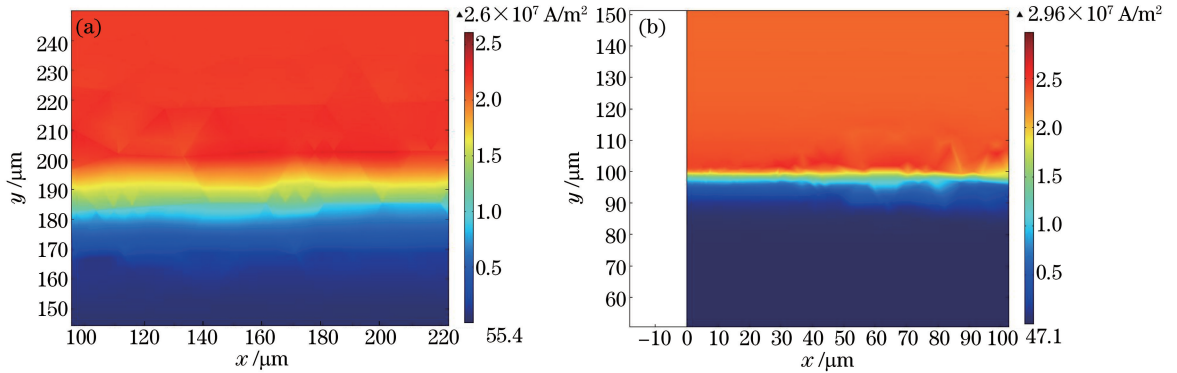


图 3 Comsol 模拟电流在半导体激光器中的分布。(a)无隔离槽;(b)有隔离槽

Fig. 3 Comsol simulated current distribution in semiconductor lasers. (a) Without isolation groove; (b) with isolation groove

计算得到整个器件的电流分布后,在有源区中心画一条侧向的三维截线,通过软件模拟计算得到截线位置的电流分布。图 4(a)所示为没有隔离槽结构的有源区截线上的电流密度分布;图 4(b)所示为引入侧向深隔离槽的激光器在有源区截线上的电流密度分布。由图 4(a)可知,电流主要分布在中间脊型台所对应的电流注入区,图 4(a)中电流注入区位置的电流密度约为 $2.12 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ($2.12 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$);图 4(b)中加入了隔离槽后中心位置的电流密度约为 $2.31 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ($2.31 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$),注入效率提高 10%。图 4(b)中加入深隔离槽后脊型边缘部分的电流积聚效应也有所减弱,表明加入隔离槽后在一定程度上抑制了侧向电流,电流更多地分布于中心受激发射区,同时隔离槽处的电流密度的数量级只有 10^4 A/m^2 ,相对于注入区而言已经很小。假定此位置已经不存在受激发射,引入隔离槽在减少阈值电流密度的同时不会影响光场分布和器件性能。

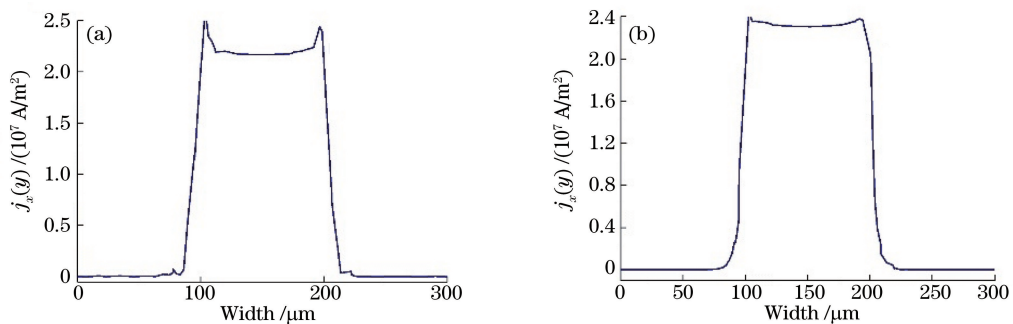


图 4 Comsol 模拟电流在有源区中的分布。(a)无隔离槽;(b)有隔离槽

Fig. 4 Comsol simulated current distribution in the active region. (a) Without isolation groove; (b) with isolation groove

3 实验过程及结果

3.1 实验过程

实验采用中心波长为 980 nm 的双量子阱大功率半导体激光器外延片,为了实现激光器的单管大功率输出,最终确定激光器的条宽为 $100 \mu\text{m}$,引线孔宽 $95 \mu\text{m}$,腔长 $4000 \mu\text{m}$ 。

基本工艺步骤如下:

- 1) 进行外延清洗;
- 2) 光刻条宽 $100 \mu\text{m}$ 的脊型台;
- 3) 利用等离子体增强化学气相沉淀淀积 400 nm 的 SiO_2 作为 ICP 掩膜,在距离脊型台两侧 $100 \mu\text{m}$ 的位置光刻宽 $20 \mu\text{m}$ 的深隔离槽,先通过湿法腐蚀将隔离槽处的 SiO_2 腐蚀掉,去胶清洗,再用 ICP 刻蚀 $4 \mu\text{m}$ 深的隔离槽;

- 4) 淀积 SiO_2 介质膜;
- 5) 光刻引线孔, 腐蚀引线孔处的 SiO_2 去胶清洗;
- 6) 溅射正面电极 Ti-Pt-Au;
- 7) 溅射背面电极 AuGeNi-Au;
- 8) 合金退火;
- 9) 解理为 4 mm 腔长的管芯。

解理后管芯 P 面朝下用 In 焊料烧结在 C-mount 热沉上, 最后封装到 TO3 管座上, 在室温下进行测试。

3.2 实验结果与讨论

在室温下测试腔长 4 mm 未镀膜的半导体激光器管芯。测试结果如图 5~6 所示, 无隔离槽结构的半导体激光器阈值电流为 350 mA, 在 $4\text{ mm} \times 95\ \mu\text{m}$ 的电流注入面积下, 阈值电流密度为 $92.1\ \text{A}/\text{cm}^2$, 工作电流为 5 A 时的输出功率为 3.2 W。而加入深隔离槽的半导体激光器阈值电流减为 300 mA, 工作电流为 5 A 时的输出功率为 3.6 W, 阈值电流密度为 $78.95\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。管芯的激光波长在 980 nm 附近。为了证明前面的设想, 将测试得到的阈值电流密度作为注入电流密度(即无沟槽结构注入 35 mA 的电流, 有深隔离槽结构注入 30 mA 的电流)注入到两种结构中并分别进行模拟计算, 得到在有源区的阈值电流密度分布。如图 7 所示, 脊型边缘的电流密度为 $1.0 \times 10^5\ \text{A}/\text{m}^2$ ($10\ \text{A}/\text{cm}^2$), 两种结构在有源区中心的受激发射区所对应的电流密度约为 $7.5 \times 10^5\ \text{A}/\text{m}^2$ ($75\ \text{A}/\text{cm}^2$), 这说明器件有源区受激发射的阈值电流密度为 $7.5 \times 10^5\ \text{A}/\text{m}^2$ ($75\ \text{A}/\text{cm}^2$) 左右。当有源区电流密度小于脊型边缘 $1.0 \times 10^5\ \text{A}/\text{m}^2$ ($10\ \text{A}/\text{cm}^2$) 时将不会产生受激发射。最初模拟时设定注入的电流为 1 A, 所对应的电流密度其实已涵盖了实际实验需要的范围, 但即使在这样大的注入电流密度下其有源区在隔离槽处的电流密度也只有 $10^4\ \text{A}/\text{m}^2$ 左右的数量级, 远小于以实验得到的有源区在脊型边缘的阈值电流密度 $1.0 \times 10^5\ \text{A}/\text{m}^2$ ($10\ \text{A}/\text{cm}^2$)。因此, 所选取的深隔离槽的位置在一般工作状态下对应的有源区将不会产生受激发射, 在降低阈值电流密度的同时不会影响激光器的光束质量和模式特性, 对器件效率和可靠性不会产生影响, 深隔离槽结构基本达到了预期的实验目标。

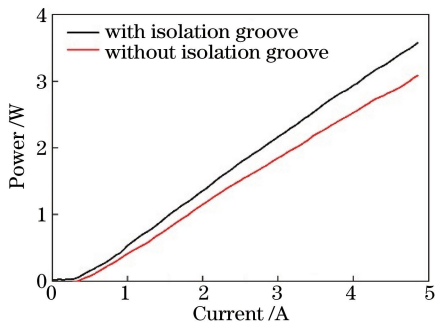


图 5 功率测试结果对比

Fig. 5 Comparison of power test results

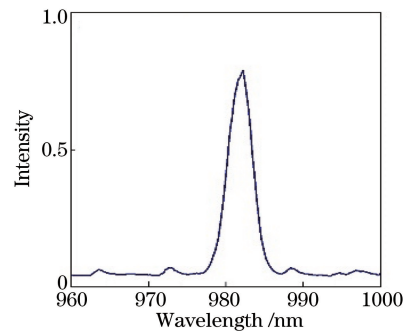


图 6 光谱曲线

Fig. 6 Curve of spectrum

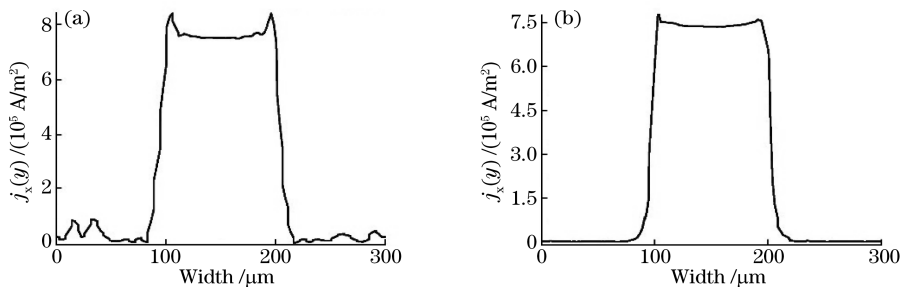


图 7 实验后 Cmsol 模拟阈值电流在有源区中的分布。(a)无隔离槽;(b)有隔离槽

Fig. 7 Cmsol simulated threshold current distribution in active region after experiment.

(a) Without isolation groove; (b) with isolation groove

4 结 论

本文设计了一种半导体激光器侧向限制结构。利用 Comsol 软件模拟电流分布,然后通过 MOCVD 外延生长,在后期工艺中利用 ICP 在激光器脊型台两侧 $100\ \mu\text{m}$ 处刻蚀 $4\ \mu\text{m}$ 的深沟,封装后未镀膜的情况下, $4\ \text{mm}$ 腔长半导体激光器单管的阈值电流密度可以达到 $78.95\ \text{A}/\text{cm}^2$, 阈值电流可达到 $0.3\ \text{A}$ 。 $30\ \text{A}$ 电流注入时输出功率可以达到 $16.8\ \text{W}$ 。测试所得到的结果与预期结果和仿真结果一致,说明设计的性能优化方法合理有效。

参 考 文 献

- [1] Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦 莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [2] Huang Dexiu. Semiconductor optoelectronics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013:140-144.
黄德修. 半导体光电子学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 140-144.
- [3] Wang Qiming. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2190-2197.
王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2190-2197.
- [4] Zou Deshu, Cui Bifeng, Li Jianjun, *et al.* Optimization on the expanding current of novel inter-band tunnel cascade coupled lasers[J]. Journal of Optoelectronic • Laser, 2001, 12(10): 989-991.
邹德恕, 崔碧峰, 李建军, 等. 隧道带间耦合级联新型激光器扩展电流的优化[J]. 光电子 • 激光, 2001, 12(10): 989-991.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Jiang Jianping. Semiconductor laser[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 52-54.
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 52-54.