

980 nm 半导体激光器 n 型波导结构优化*

安 宁, 芦 鹏, 魏志鹏, 李占国, 马晓辉, 刘国军

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

摘 要: 为了提高 980 nm 半导体激光器的输出功率并获得较小的远场发散角,在非对称波导结构的基础上设计了 n 型波导结构,即在 n 型波导中引入高折射率的内波导层。采用理论计算和 SimLastip 软件模拟对常规非对称波导结构和内波导结构进行了研究。利用分子束外延系统生长 980 nm 内波导结构的外延材料,并制作了激光器。对于条宽为 100 μm 、腔长为 1000 μm 的器件,阈值电流为 97 mA,斜率效率为 1.01 W/A;当注入电流为 500 mA 时,远场发散角为 29° (垂直向) $\times 8^\circ$ (水平向),与模拟结果相符。理论计算和实验结果表明:较之于常规非对称波导结构,内波导结构可有效降低光场限制因子,提高输出功率,减小远场发散角。

关键词: 980 nm 半导体激光器; 输出功率; 内波导; 远场发散角

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201426.101015

980 nm 应变量子阱半导体激光器在光通讯、军事和医疗等领域中受到高度重视^[1-2]。这些应用不仅要求激光器有高的光功率,而且要求有小的远场发散角。但对于传统激光器而言,垂直方向发散角很大,通常为 $35^\circ \sim 60^\circ$,水平方向发散角为 $8^\circ \sim 12^\circ$ 。水平和垂直方向的不对称性对光束聚集、准直以及整形都有很大影响^[3]。为了解决这一问题,许多研究者进行了大量研究。Xiong 等人^[4]通过优化 p 型波导层的掺杂浓度分布和厚度降低了器件内损耗,提高了半导体激光器的输出功率,但不能有效减小垂直发散角;S. D. Chervinskii 等人^[5]采用极窄波导结构减小了半导体激光器近场光斑,但输出功率较小;J. Piprek^[6]等人采用大光腔结构减小了激光器的垂直发散角,但容易引入高阶模式激励。

为了提高输出功率并减小远场发散角,本文在非对称波导结构的基础上^[7],设计了 n 型波导结构。采用理论计算和 SimLastip 软件模拟对非对称波导和内波导激光器结构进行研究,同时制备了 980 nm 内波导结构半导体激光器。

1 理论分析

对于有源区材料,当器件腔面的光学灾变性损伤(COD)功率密度 P_{COD} (与有源区材料及表面复合速率有关)一定时,器件的最大输出功率为^[8]

$$P_{\text{max}} = \frac{d_{\text{QW}}}{\Gamma_{\text{QW}}} W \left(\frac{1-R}{1+R} \right) P_{\text{COD}} \quad (1)$$

式中: d_{QW} 为量子阱厚度; W 为条宽; Γ_{QW} 为有源区光限制因子; R 为前腔面反射率。由式(1)可知,对于一定条宽、某特定波长的半导体激光器,器件的输出功率与 Γ_{QW} 成反比。因此,若给定有源区材料,可通过降低有源区光限制因子来提高器件的输出功率,得到更大的光点尺寸。

根据半导体激光器光场分布的特性和限制因子 Γ_{QW} 的定义^[9],可以得到

$$\Gamma_{\text{QW}} = \frac{d_{\text{QW}}}{0.3885 d_{\text{w}}^{\frac{3}{2}} (n_{\text{w}}^2 - n_{\text{c}}^2)^{\frac{3}{4}} + 0.1675 \lambda^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

式中: d_{w} 为实际的波导厚度; n_{w} , n_{c} 为波导层和限制层的折射率; λ 为激光波长。

如图 1 所示,有源区光限制因子 Γ_{QW} 随波导厚度的增加而减小。因此,为了得到较小的 Γ_{QW} ,应选择较大的波导厚度。但是当波导层厚度增加到一定值时,会出现相应的多阶模。例如,当波导厚度分别为 0.28, 0.53

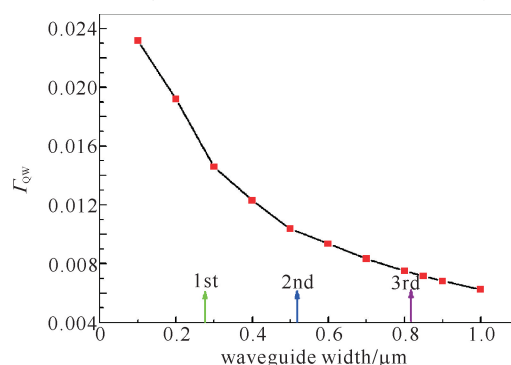


Fig. 1 Relationship between optical confinement factor and waveguide width

图 1 有源区光限制因子与波导厚度之间的关系

* 收稿日期:2014-03-26; 修订日期:2014-07-04

基金项目:国家自然科学基金项目(61006039, 61370043)

作者简介:安 宁(1988—),女,博士,主要从事 III-V 族半导体材料及器件研究;anning4252@126.com。

通信作者:刘国军(1964—),男,博士,教授,主要从事半导体光电子器件的研究;gjliu626@126.com。

和 $0.81\ \mu\text{m}$ 时,会产生相应的一阶、二阶和高阶模。随着波导厚度的增加,电流注入条件下会引起模式竞争,影响器件的出光功率。为了得到较小的 Γ_{QW} ,保证器件单模工作,同时考虑材料生长条件,我们取 n 型波导厚度为 $0.25\ \mu\text{m}$ 。由于空穴迁移率较低(一般比电子迁移率小 1 个数量级),p 型波导层的电阻是引起器件高串联电阻、高损耗的主要因素^[10]。同时,p 型空穴光吸收系数远大于 n 型电子光吸收系数^[11],为了降低半导体激光器的内损耗,应避免光场与 p 型波导层重叠,多采用非对称波导结构。因此,p 型波导厚度选为 $0.1\ \mu\text{m}$ 。

波导层材料体系选择 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。采用组分渐变可降低异质结界面上的电压降,避免突变波导中突变异质结能带界面带来的电压损耗,防止外延时 Al 扩散进入量子阱层^[12]。n 型波导层 Al 组分选取 $0.3\sim 0.45$,p 型波导层 Al 组分选取 $0.3\sim 0.55$ 。

为了使有源区的光场在 n 型波导一侧得到进一步的扩展,减小垂直发散角,增加垂直方向上的近场光斑尺寸,降低端面输出光功率密度,在 n 型波导中引入 $0.05\ \mu\text{m}$ 厚的高折射率内波导结构,使得有源区的光场适当地耦合到内波导结构附近,可有效降低光场限制因子,得到更大的输出功率。当入射波长 λ 为 $980\ \text{nm}$ 时,材料折射率与 Al 组分的关系如图 2 所示, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 折射率随 Al 组分升高而降低。由于 n 型波导组分设为 $0.3\sim 0.45$,我们将内波导层中 Al 组分设为 0.2 。另外,为了降低器件电阻,减少器件热损耗,对内波导进行了少量掺杂。

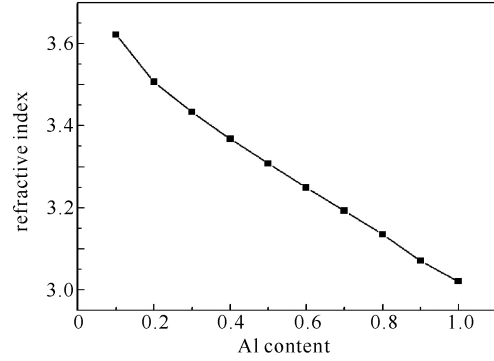


Fig. 2 Relationship between refractive index and aluminum content of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ material

图 2 折射率与 Al 组分之间的关系

2 软件模拟

实验采用 Crosslight 公司的专业软件 SimLstip 对非对称波导和内波导激光器结构进行模拟。其中,非对称波导结构由下及上分别为:n-GaAs(掺 Si: $0.8\times 10^{18}\sim 4\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$)衬底, $0.1\ \mu\text{m}$ 厚的 n-GaAs 缓冲层(掺 Si: $5\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$), $1.8\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}$ n 型包层(掺 Si: $1\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$)^[13], $0.25\ \mu\text{m}$ 厚非掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n 型波导层($x=0.3\sim 0.45$), $7\ \text{nm}/50\ \text{nm}$ 的非掺杂 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ^[14]有源区, $1.5\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ p 型波导层($x=0.3\sim 0.55$), $1.5\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ p 型包层(掺 Zn: $1\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$)^[13], $0.2\ \mu\text{m}$ 厚的 GaAs 欧姆接触层(掺 Zn: $2\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$)。在内波导结构中,我们将 n 型波导层($x=0.3\sim 0.45$)设计成 $0.1\ \mu\text{m}$ 厚的 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 内波导层(掺 Si: $5\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$), $0.05\ \mu\text{m}$ 厚非掺杂 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ n 型波导层, $0.1\ \mu\text{m}$ 厚非掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ n 型波导层($x=0.3\sim 0.6$)。其它结构相同。

从表 1 数据可以看出,优化后内波导结构的有源区光限制因子 Γ_{QW} 是非对称波导结构的 $1/2$ 。根据式(1),其最大输出功率将为非对称波导结构的 2 倍。另外,内波导结构的 p 型波导限制因子 Γ_{p} 是非对称波导结构的 $1/4$ 。这表明,与非对称波导结构相比,内波导结构的光场远离了 p 型波导一侧,光场与高掺杂的 p 限制层重叠少,有效减少了因掺杂和自由载流子带来的光吸收损耗,器件的输出特性将显著改善。

图 3 为不同波导结构半导体激光器的近场分布。其中,(a)为非对称结构;(b)为内波导结构。从图 3 可以看出,与常规的非对称结构不同,内波导结构的近场分布出现次峰,而次峰的位置恰好是内波导的位置,有源区的光场耦合到 n 型波导层,近场光斑变大。由于近场光场得到有效的扩展,光场模式体积将增大,进而可有效减小光功率密度。因此,在相同的 COD 阈值下器件能获得更高的光输出功率。

图 4 为不同结构的半导体激光器的远场发散角。相对于非对称结构而言,由于采用内波导结构的半导体激光器的光场在 n 型一侧得到扩展,其远场发散角明显减小。其中,垂直发散角从 39° 减小到 26° ,水平发散角由 13° 减小到 6° 。

表 1 非对称波导与内波导结构的不同外延层的限制因子

Table 1 Optical confinement factors of various epitaxial layers for asymmetric waveguide and inner waveguide lasers

	Γ_{QW}	Γ_{p}
asymmetric waveguide	0.020 1	0.128 0
inner waveguide	0.010 6	0.035 0

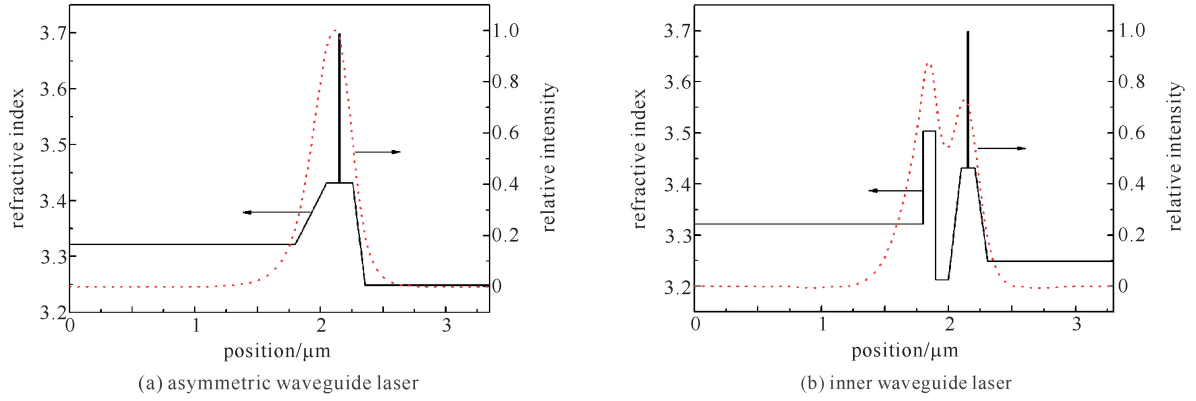


Fig. 3 Optical field intensity and epitaxial laser's refractive index of different lasers

图 3 不同波导结构激光器的光场强度和延结构的折射率分布

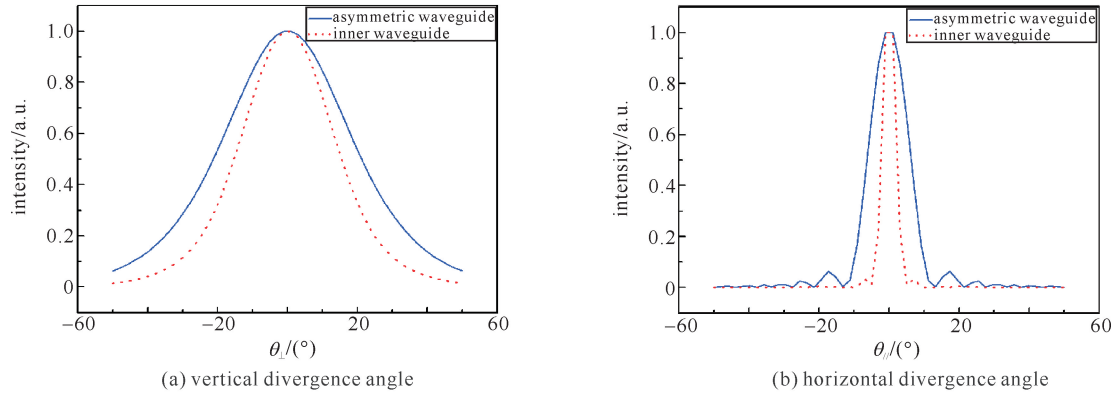


Fig. 4 Simulated far field curves of asymmetric and inner waveguide lasers

图 4 非对称波导与内波导结构激光器的模拟远场曲线

3 器件制备及测试

依据上述内波导结构,利用分子束外延(MBE)对器件材料进行外延生长。由于有较好的背景气氛,缓冲层与下限制层(含 Al 渐变层)生长的衬底温度变化期间采取了间断生长技术,保证了外延材料的质量^[15]。经测试筛选,进行了如下工艺过程:首先光刻腐蚀出 100 μm 条宽的台面,再通过磁控溅射法蒸镀 p 面 Ti/Pt/Au;n 面经减薄抛光后,真空蒸镀 Au/Ge/Ni;外延片在 410 $^{\circ}\text{C}$ 氮气环境中退火 3 min,形成 p 型和 n 型的欧姆接触;然后利用实验室成熟的芯片工艺制作 1000 μm 单管芯激光器(前后腔面分别镀折射率为 5% 的增透膜与反射率为 95% 的增反膜);最后对器件的电学和光学特性进行测试。

设计的 980 nm 内波导半导体激光器的光电特性测试结果如图 5 所示。中心波长为 980.88 nm,光谱半宽为 2.3 nm,如图 5 插图所示。由图 5 中 $P-I$ 和 $V-I$ 关系曲线可见,器件的阈值电流为 97 mA,斜率效率为 1.01 W/A,500 mA 下的光输出功率为 398 mW。图 6 为在 500 mA 时器件的远场曲线,器件的垂直发散角和水平

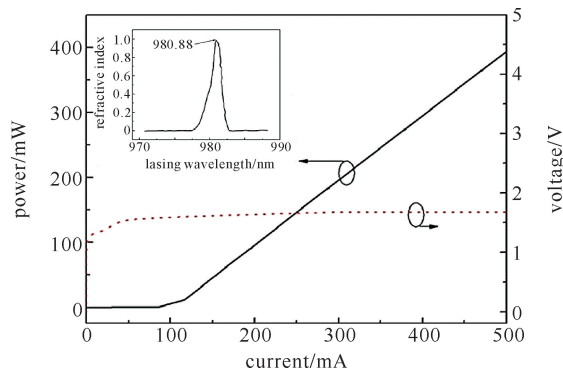

 Fig. 5 $P-I$ and $V-I$ curves of device

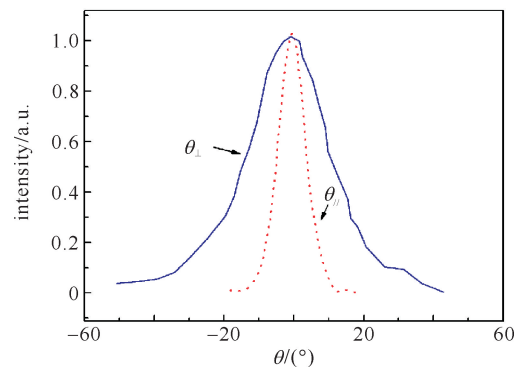
 图 5 器件的 $P-I$ 和 $V-I$ 特性曲线


Fig. 6 Far field curves of device

图 6 器件远场曲线

发散角分别为 29° 和 8° , 与软件模拟值 $26^\circ(\theta_\perp) \times 6^\circ(\theta_\parallel)$ 基本相符, 相对于非对称结构 $39^\circ(\theta_\perp) \times 13^\circ(\theta_\parallel)$ 有大幅度减小, 说明在 n 型波导中加入内波导层可有效减小器件的远场发散角。

4 结 论

本文通过在 980 nm 应变量子阱半导体激光器 n 型波导层中引入高折射率的内波导结构, 实现了 n 型波导结构的优化。利用 SimLastip 软件对所设计的激光器结构进行模拟, 模拟结果表明: 内波导结构可有效减小有源区光限制因子(0.010 6)、获得小的光斑尺寸 $26^\circ(\theta_\perp) \times 6^\circ(\theta_\parallel)$ 。这为器件实现高输出功率、得到低输出密度提供了一种新的有效途径。同时, 利用分子束外延系统进行了 980 nm 内波导结构半导体激光器外延材料的生长。对于条宽为 100 μm 、腔长为 1000 μm 的器件, 阈值电流为 97 mA, 斜率效率为 1.01 W/A; 当注入电流为 500 mA 时, 远场发散角为 $29^\circ(\theta_\perp) \times 8^\circ(\theta_\parallel)$, 与模拟结果基本相符。与常规非对称波导结构相比, 内波导结构的光场在 n 型波导一侧得到了进一步的扩展, 有源区光限制因子减小了一半, 从而有效提高了器件的最大输出功率。同时, 远场发散角减小, 得到了更大的光点尺寸, 降低了器件腔面的功率密度, 避免了器件发生灾变性损伤。

参考文献:

- [1] Bugarjski M, Mrozwicz B, Reginski K, et al. Strained layer SCH SQW InGaAs/GaAs laser for 980 nm band[J]. *Opto-electronics*, 2001, **9**(1): 35-47.
- [2] Rossin V, Zuker E, Peters M, et al. High-power high-efficiency 910-980 nm broad area laser diodes[C]//Proc of SPIE. 2004, **5336**:196-202.
- [3] 刘刚, 唐晓军, 王超, 等. 高功率半导体激光器微通道热沉的方案设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(8): 2058-2061. (Liu Gang, Tang Xiaojun, Wang Chao, et al. Design of micro-channel heat sink for high power laser diode. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(8): 2058-2061)
- [4] 熊聪, 崇锋, 王俊, 等. 高效率半导体激光器波导层掺杂的优化设计[J]. 光电器件, 2010, **30**(1):16-19. (Xiong Cong, Chong Feng, Wang Jun, et al. Doping profile optimization and design of waveguide layer for laser diode with high conversion efficiency. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, **30**(1):16-19)
- [5] Piprek J. Inverse thermal lens effects on the far-field blooming of broad area laser diodes[J]. *Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(10): 958-960.
- [6] Chervinskii S D, Ryvkin B S, Shernyakov Y M, et al. Radiative characteristics of semiconductor injection lasers based on narrow asymmetric waveguides[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, **461**:012024.
- [7] 王俊, 白一鸣, 刘媛媛, 等. 非对称波导结构提高 980 nm 激光二极管电光效率的机理研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(8): 1785-1789. (Wang Jun, Bai Yiming, Liu Yuanyuan, et al. Mechanisms of high efficiency for 980 nm diode lasers with asymmetric waveguide structure. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(8): 1785-1789)
- [8] Ziegler M, Hempel M, Larsen H E, et al. Physical limits of semiconductor laser operation: A time-resolved analysis of catastrophic optical damage[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**: 021110.
- [9] Muhanna A, Alharbi A, Salhi A. Waveguide design optimization for long wavelength semiconductor lasers with low threshold current and small beam divergence[J]. *Journal of Modern Physics*, 2011, **2**(4): 225-230.
- [10] Cotal H, Fetzter C, Boisvert J, et al. III-V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics[J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, **2**(2): 174-192.
- [11] Lysevych M, Tan H H, Karouta F, et al. Merged beam laser design for reduction of gain saturation and two-photon absorption in high power single mode semiconductor lasers[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(7):8276-8285.
- [12] Chen Y K, Wu M C, Hobson W S, et al. High-temperature operation of periodic index separate confinement heterostructure quantum well laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1991, **59**(22): 2784-2786.
- [13] Kosiel K, Muszalski J, Szerling A, et al. High power (>1 W) room-temperature (300 K) 980 nm continuous-wave AlGaAs/InGaAs/GaAs semiconductor lasers[J]. *Optica Applicata*, 2007, **6**(4): 424-432.
- [14] Coleman J J. Strained-layer InGaAs quantum-well heterostructure lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(6): 1008-1013.
- [15] 李梅, 宋晓伟, 王晓华, 等. MBE 生长 GaAlAs/GaAs 量子阱激光器材料的光谱和结构特性研究[J]. 兵工学报, 2001, **21**(3): 355-358. (Li Mei, Song Xiaowei, Wang Xiaohua, et al. A study of photoluminescence and the structural characteristics of GaAlAs/GaAs quantum well lasers. *Acta Armamentarii*, 2001, **21**(3): 355-358)

Optimization of n-type waveguide structure for 980 nm diode laser

An Ning, Lu Peng, Wei Zhipeng, Li Zhanguo, Ma Xiaohui, Liu Guojun
(*National Key Laboratory of High Power Diode Laser, Changchun University of
Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: In order to raise the output power and lower the far field divergence angles of 980 nm diode laser, a high refractive index inner waveguide is introduced in the n-type waveguide structure, which is based on the asymmetric waveguide structure. The research is conducted by SimLastip. Meanwhile, the semiconductor laser is fabricated with the epitaxial layer grown by a solid source molecular beam epitaxy (MBE) system. The fabricated 980 nm laser diode with 100 μm strip width and 1000 μm cavity length has a threshold current of 97 mA and a slope efficiency of 1.01 W/A. When the injection current is 500 mA, the far field divergence angles are 29° (vertical) by 8° (horizontal), which is consistent with the simulated result. The theoretical and experimental results indicate that the inner waveguide structure can achieve high power output, effectively reduce the far field divergence angle and improve the beam quality of the device.

Key words: 980 nm semiconductor lasers; output power; inner waveguide; far field divergence angle

PACS: 42.55.Px; 42.60.Jf; 42.79.Gn