

文章编号: 0258-7025(2007)08-1037-06

808 nm 大功率无铝有源区非对称 波导结构激光器

仲 莉, 王 俊, 冯小明, 王勇刚, 王翠鸾, 韩 琳, 崇 锋, 刘素平, 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 采用分别限制非对称波导结构, 将光场从对称分布变为非对称分布, 降低了载流子光吸收损耗, 并允许 p 型区具有更高的掺杂水平, 从而使器件电阻降低。对 GaAsP/GaInP 张应变单量子阱(SQW)非对称波导结构激光器的光场特性进行了理论分析, 设计了波导层厚度, 并制作了波长为 808 nm 的无铝有源区大功率半导体激光器。器件综合特性测试结果为: 腔长 900 μm 器件的阈值电流密度典型值为 400 A/cm^2 , 内损耗低至 1.0 cm^{-1} ; 连续工作条件下, 150 μm 条宽器件输出功率达到 6 W, 最大斜率效率为 1.25 W/A。器件激光波长为 807.5 nm, 平行和垂直结的发散角分别为 3.0° 和 34.8°。20~70 $^{\circ}\text{C}$ 范围内特征温度达到 133 K。结果表明, 分别限制非对称波导结构是降低内损耗, 提高大功率半导体激光器特性的有效措施。

关键词 激光器; 非对称波导; GaAsP/GaInP 张应变量子阱; 金属有机化学气相外延

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

808 nm High-Power Lasers with Al-Free Active Region with Asymmetric Waveguide Structure

ZHONG Li, WANG Jun, FENG Xiao-ming, WANG Yong-gang,
WANG Cui-luan, HAN Lin, CHONG Feng, LIU Su-ping, MA Xiao-yu

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

Abstract Shifting of the optical mode from symmetric distribution to asymmetric distribution by separate confinement asymmetric waveguide structure reduces optical absorption loss by carriers, and permits higher doping of the p side to reduce resistance. Based on the theoretical analysis for the optical field distribution characteristics of GaAsP/GaInP tensile-strained single quantum well (SQW) lasers with asymmetric waveguide, the thickness of waveguide layers was optimized, and a high-power semiconductor laser with Al-free active region was fabricated and studied experimentally. For a 900 μm cavity length device, the typical threshold current density is 400 A/cm^2 , and a low internal loss around 1.0 cm^{-1} is achieved. Under continuous wave (CW) operation condition, 150 μm aperture devices achieve a CW output power of 6 W, the maximum slope efficiency of the prepared devices is 1.25 W/A, and the lasing wavelength is 807.5 nm. Horizontal and vertical far-field divergence angles are 3.0° and 34.8°, respectively. The characteristic temperature of the laser in the range of 20~70 $^{\circ}\text{C}$ is estimated to be about 133 K. Separate confinement asymmetric waveguide structure is proven to be an impactful method for reducing optical loss and improving the characteristics of high power diode lasers.

Key words lasers; asymmetric waveguide; GaAsP/GaInP tensile-strained quantum well; metal organic chemical vapor deposition

收稿日期: 2006-12-22; 收到修改稿日期: 2007-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(9140A02011406ZK03)资助项目。

作者简介: 仲 莉(1980—), 女, 江苏人, 博士研究生, 目前主要从事大功率半导体激光器方面的研究工作。

E-mail: zhongli@semi.ac.cn

导师简介: 马晓宇(1963—), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为半导体光电子器件。E-mail: maxy@semi.ac.cn

1 引 言

大功率808 nm半导体激光器被广泛应用于抽运Nd:YAG固体激光器、激光加工和激光医疗等领域。为了获得稳定的高功率输出,目前普遍采用的是大光腔^[1~4]甚至超大光腔结构^[5]。这种结构具有较大的等效横向光斑尺寸,因而可在发生腔面光学灾变之前获得高输出光功率和小横向远场发散角^[6]。但是,在对称的波导结构中,进一步减小光限制因子会导致较强的载流子泄漏和高阶横模的产生^[7],而增加有源区厚度会增加串联电阻^[8],因此限制了激光器的连续高功率输出。而且,p型限制层载流子迁移率比较低,故通常对p型施以比较高的掺杂以减小串联电阻。这样,在对称结构中,虽然大部分激光被限制在波导中,但仍有一部分在掺杂区域的光子由于载流子运动时与光子相互作用,对光子散射造成光吸收而损耗掉,使得p型高掺杂区自由载流子的光吸收成为主要的损失因素^[9]。对称波导结构中侧模限制也很弱,由温度梯度在侧向上引起的波导也使输出模式变得不稳定^[10]。解决上述问题的一个方法是采用非对称波导结构,即改变波导区的折射率分布和波导宽度等参数。Petrescu等^[11]设计并制作了第一个非对称宽波导激光器,获得了较大的有效光斑尺寸和小的光吸收系数,但是阈值电流密度过高限制了器件的连续高功率工作。随后,相继报道了优化限制层或波导层参数的非对称波导结构实现连续高效率输出功率^[8,12,13]。最近,JDS Uniphase公司为提高电光转换效率也报道了波长940 nm的非对称波导结构半导体激光器,室温下最大输出功率为9.5 W,转换效率达到67%^[9,14]。本文设计、制作了波长为808 nm的无铝GaAsP/GaInP张应变单量子阱(SQW)非对称波导结构大功率半导体激光器,并对器件性能参数进行了测试分析。

2 非对称波导结构的设计

波导区外掺杂区域内的光吸收正比于掺杂区的掺杂浓度,降低掺杂浓度可以减小光损失,但是这样会导致串联电阻增大,最终使器件的电光转换效率降低^[13]。非对称波导结构设计是基于p型材料中空穴对光的吸收比n型材料中电子对其吸收大的事实,将光场从对称分布变为非对称分布。非对称波导结构各层材料导带能量分布如图1(a)所示。与

对称波导结构图1(b)相比^[15],非对称波导结构提高了p型波导层和限制层AlGaInP的铝组分,p型限制层用高带隙的AlGaInP材料减小载流子泄漏。为了防止外延时铝通过扩散进入量子阱层,在p型波导层前先长20 nm厚的GaInP层。激光器非对称折射率分布使光模远离激光器p型材料一侧,减小p型限制层的光限制因子,增加n型材料一侧的折射率使模式进入此侧,从而减小了高掺杂p型限制层自由载流子的光吸收和散射,降低了内部损耗。

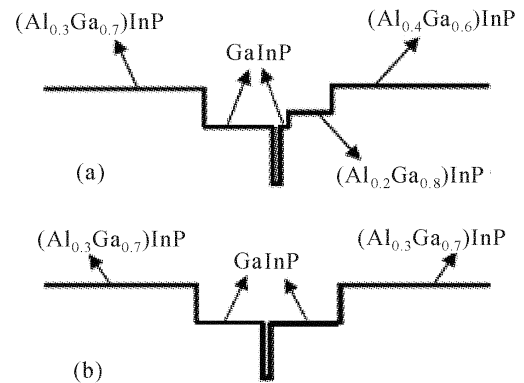


图1 导带示意图

(a) 非对称波导结构;(b) 对称波导结构

Fig. 1 Schematic of conduction band with

(a) asymmetric-waveguide structure;

(b) symmetric-waveguide structure

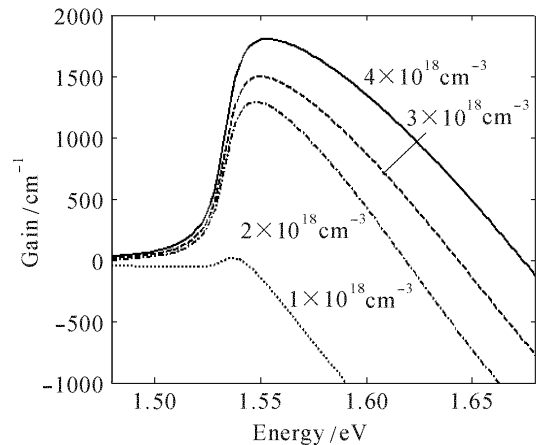


图2 16 nm厚GaAsP/GaInP单量子阱的增益谱(TM模)

Fig. 2 Gain spectra of 16 nm thick GaAsP/GaInP single quantum well (TM mode)

有源区采用16 nm厚的GaAsP/GaInP张应变单量子阱,其激射光为TM模,图2给出了不同注入载流子浓度的增益谱。为了确定n型和p型波导层的厚度,利用TM模的边界条件求解一维平板波导中的麦克斯韦方程组,计算并分析比较了不同波导层厚度的有源区光限制因子,p型限制层光限制

因子和远场垂直发散角^[16]。由于光场模式的非对称分布,计算时综合考虑了基模 TM_0 , 一阶模 TM_1 和二阶模 TM_2 的特点及其相互影响。计算结果表明,当 n 型波导层厚度小于 $0.4 \mu\text{m}$ 时,在很大范围内 TM_2 模是截止的,但是 TM_0 模和 TM_1 模容易产生竞争,激光器工作时会引起“光功率-电流”曲线扭折,阈值电流增加;而且此时 p 型限制层对 TM_0 模的光限制因子较大,对 TM_1 模的光限制因子较小,使得 TM_0 模的光损耗相对较大;当 n 型波导层厚度大于 $0.5 \mu\text{m}$ 时,虽然 TM_1 模对 TM_0 模的影响大大减小,而且可以通过控制 p 型波导层厚度使 TM_2 模截止,但是这时的有源层光限制因子较小,阈值电流较大。图 3 给出了 n 型波导层厚度 $d_n = 0.45 \mu\text{m}$ 时各参数随 p 型波导层厚度 d_p 的变化关系。由图中可见, TM_0 模的有源区光限制因子随着 p 型波导层厚度的增加而逐渐增加, TM_1 模的有源区光限制因子远小于 TM_0 模,而对于 TM_2 模,仅当 p 型波导层的厚度 d_p 大于 470 nm 时存在。通过理论分析设计出了优化的非对称波导结构,图 1(a) 给出其导带示意图。

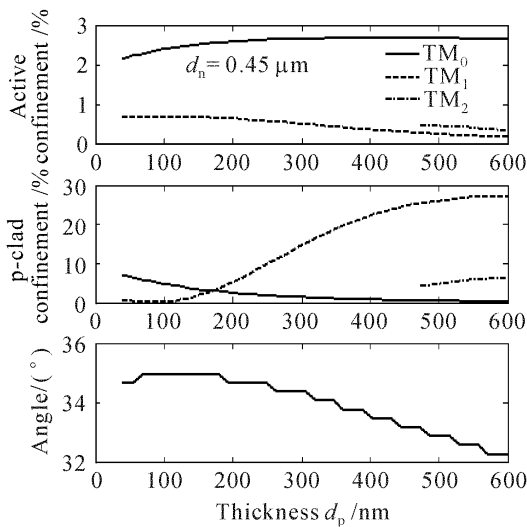


图 3 n 型波导层的厚度 d_n 为 $0.45 \mu\text{m}$ 时,有源区光限制因子, p 型限制层光限制因子和远场垂直发散角随 p 型波导层厚度 d_p 变化的函数曲线

Fig. 3 Active region confinement factor, p-cladding layer confinement factor and far-field vertical-divergence angle of the laser as a function of p-cladding layer thickness d_p with $0.45 \mu\text{m}$ thick n-cladding layer

图 4 给出了非对称波导结构的折射率与基模光场分布。在这种结构中,载流子和光学模被有效地束缚在有源区中,使阈值电流密度也得到了限制。p 型波导层和限制层导带边势能的提高增强了对电子

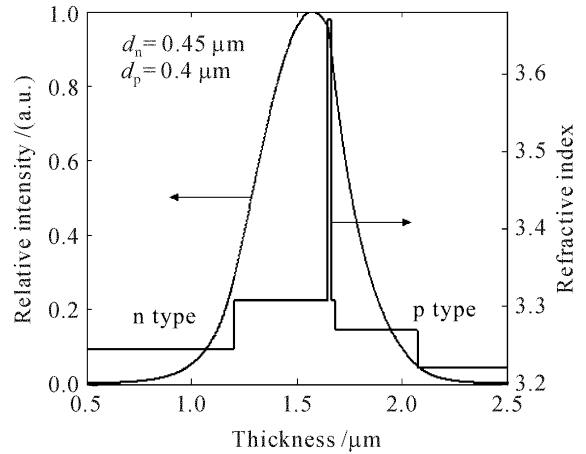


图 4 非对称波导结构的折射率和基模光场分布
Fig. 4 Refractive index and fundamental optical mode profile of asymmetric waveguide structure

的限制能力,减小了从有源区向 p 型波导层和限制层的漏电流,器件的温度特性得到了改善。由于 p 型波导层和限制层对光场限制的加强, p 型限制层的厚度也可适当减小,从而减小了器件的串联电阻和热阻。

3 外延生长及器件制作工艺

采用低压-金属有机化学气相外延 (LP-MOCVD) 多片外延系统进行材料生长,生长时的载气为经过钨管纯化的 H_2 , III 族源为 TMGa , TMIn 和 TMAI , V 族源为 100% 的 PH_3 和 AsH_3 , n 型掺杂剂为 SiH_4 , p 型掺杂剂为 DMZn 。生长温度为 $600 \sim 750 \text{ }^\circ\text{C}$, 反应室压力保持在 $6 \sim 10 \text{ kPa}$, 气体总流量为 50 L/min 。在 n-GaAs (掺 $\text{Si}: 0.8 \times 10^{18} \sim 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 衬底上依次生长如下各层: $0.4 \mu\text{m}$ 厚的 n-GaInP 缓冲层, $1.2 \mu\text{m}$ 厚的 AlGaInP 下包层 (掺 $\text{Si}: 1 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $0.45 \mu\text{m}$ 厚非掺杂 GaInP 下波导层, 16 nm 非掺杂 GaAsP 有源层, 20 nm 非掺杂 GaInP, $0.4 \mu\text{m}$ 厚的非掺杂 AlGaInP 上波导层, $1.2 \mu\text{m}$ 厚的 AlGaInP 上包层 (掺 $\text{Zn}: 1 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), $0.25 \mu\text{m}$ 厚的 GaAs 欧姆接触层 (掺 $\text{Zn}: 0.5 \times 10^{20} \sim 1.5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)。非对称波导无铝激光器外延片结构如图 5 所示。

将外延片 p 面沉积一层 SiO_2 , 光刻制作成 $150 \mu\text{m}$ 宽的条形接触;通过磁控溅射方法制作 p 面 TiPtAu 电极;经减薄抛光后,真空蒸镀 n 面 AuGeNi, 最后溅射 n 面厚金。将大片解理成不同腔长的 bar 条,一部分解理成的管芯,用激光器综合测试仪在脉冲条件 ($30 \mu\text{s}$, 100 Hz) 下进行特性测试。

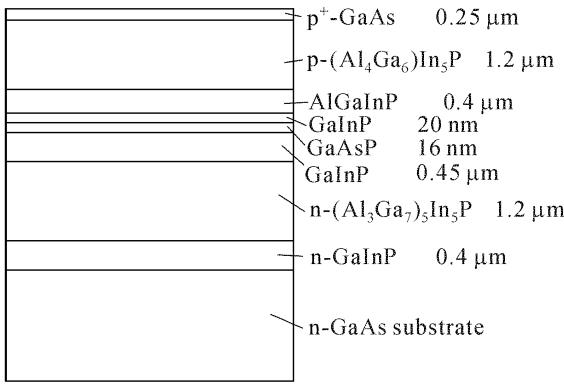


图 5 非对称波导无铝有源区单量子阱激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic structure of the SQW laser with asymmetric waveguide Al-free active-region

另外一部分进行腔面镀膜,增透膜 5%,高反膜 95%。解理成管芯后 p 面朝下烧结在铜热沉上,经 TO 封装后测试其在连续工作电流下的特性。

4 激光器特性测试结果和分析讨论

根据管芯的测试数据,将其外微量子效率对腔长进行了线性拟合,得到其内损耗和内量子效率分别为 $\alpha_i = 1.0 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\eta_i = 86.1\%$,如图 6 所示。

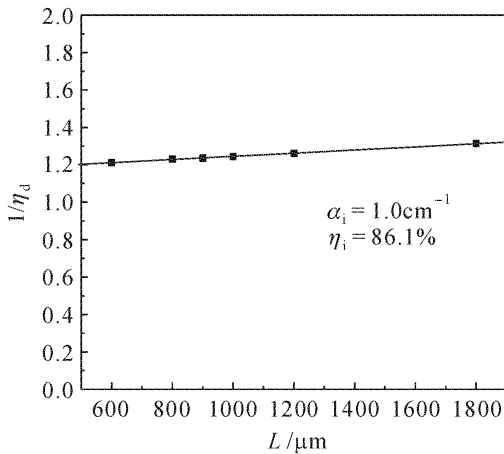


图 6 外微量子效率倒数 $1/\eta_d$ 与腔长 L 的关系曲线

Fig. 6 Relationship of $1/\eta_d$ and L

一般半导体激光器的内损耗约为 $2 \sim 5 \text{ cm}^{-1}$ ^[17],对称宽波导结构的内损耗也较难接近 1.0 cm^{-1} ^[18~22]。很多情况下,内损耗的降低常伴随低的内量子效率^[18]。此时,阈值电流密度 J_{th} 的大小取决于腔长,而透明电流密度 J_0 可看作常数。由阈值电流密度的表达式

$$J_{th} = \frac{1}{\eta_i} J_{tr} \exp \left[\frac{1}{G_0} \left(\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \right], \quad (1)$$

可得出 $\ln J_{th}$ 与 $1/L$ 服从线性关系,其线性拟合曲线如图 7 所示。由内量子效率 η_i 和内损耗 α_i ,得到其透明电流密度 $J_{tr} = 149 \text{ A/cm}^2$ 和模增益 $G_0 = 25.5 \text{ cm}^{-1}$ 。

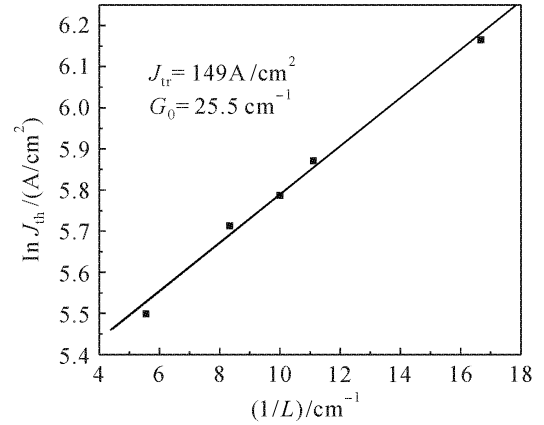


图 7 阈值电流密度对数 $\ln J_{th}$ 与腔长倒数 $1/L$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship of $\ln J_{th}$ and $1/L$

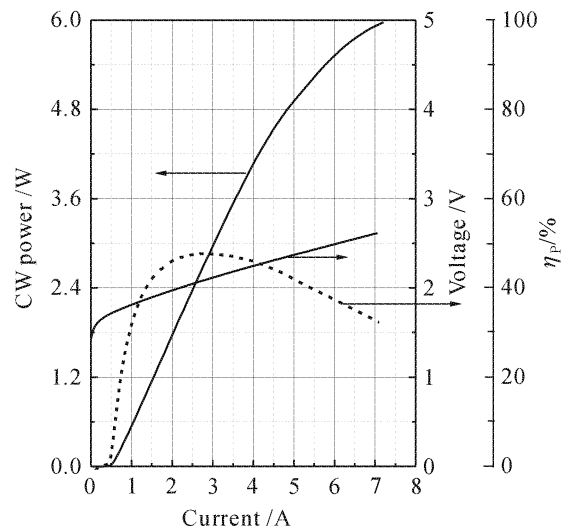


图 8 $150 \mu\text{m}$ 条宽, $900 \mu\text{m}$ 腔长非对称波导结构单量子阱激光器室温连续电流下测得的输出光功率、电压、电光转换效率特性曲线图

Fig. 8 Measured CW output power, voltage and electric-to-optical conversion efficiency from an asymmetric waveguide SQW laser with a $150 \mu\text{m}$ wide stripe and a $900 \mu\text{m}$ long cavity at room temperature

在连续电流条件下测试 $150 \mu\text{m}$ 条宽, $900 \mu\text{m}$ 腔长的激光器光电特性,其结果如图 8 所示。器件的阈值电流为 540 mA (阈值电流密度 400 A/cm^2),串联电阻为 0.19Ω 。当注入电流为 2.72 A 时,输出功率为 2.73 W ,得到最大斜率效率和功率转换效率分别为 1.25 W/A 和 47.7% 。室温连续输出功率可达到 6 W 。由图 9(a) 的远场曲线得到 1 W 时平行结和

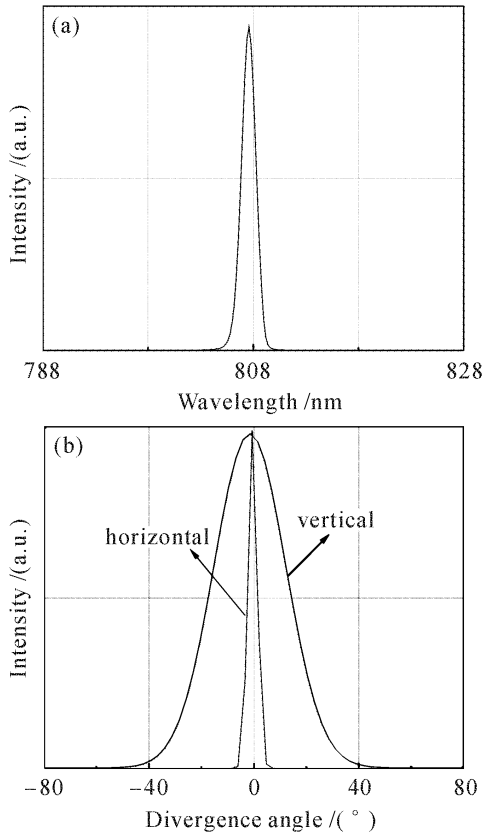


图 9

(a) 光谱图; (b) 远场发散角 $\theta_{//} = 3.0^\circ$, $\theta_{\perp} = 34.8^\circ$

Fig. 9

(a) lasing spectra at 1 W;

(b) vertical and horizontal far-field divergence angles with $\theta_{//} = 3.0^\circ$, $\theta_{\perp} = 34.8^\circ$

垂直结的发散角分别为 3.0° 和 34.8° , 从图 9(b) 光谱图可见, 激光中心波长为 807.5 nm , 光谱半宽为 1.6 nm , 窄的光谱半宽表明激光器外延结构较好的均匀性^[23]。对于半导体激光器抽运固体激光器的应用来说, 窄的远场发散角和光谱半宽都会使抽运效率大大提高。

对于 808 nm 无铝有源区器件俄歇复合可以忽略不计^[24], 高温工作时激光器有源区材料的增益减小, 激光器腔内对光子的损耗增加, 但使其高温特性变差更重要的原因是量子阱垒层 GaInP 及限制层 AlGaInP 的导带带阶小, 注入有源区的载流子容易泄漏到波导层和包层^[15, 24, 25]。无铝 808 nm 对称波导结构半导体激光器在 $20 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围的特征温度约为 $70 \sim 110 \text{ K}$ ^[5, 26, 27]。如前所述, 结构中 p 型限制层的导带边势能的提高增强了对电子的限制能力, 改善了器件的温度特性。根据阈值电流与温度的经验关系式

$$J_{\text{th}}(T) = J_{\text{th}}(T_r) \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right), \quad (2)$$

在连续电流下测试不同温度时器件的阈值电流, 得到在 $22 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内 $600 \mu\text{m}$, $800 \mu\text{m}$, $1000 \mu\text{m}$, $1200 \mu\text{m}$ 腔长的特征温度 T_0 分别为 110 K , 116 K , 121 K 和 133 K , 如图 10 所示。

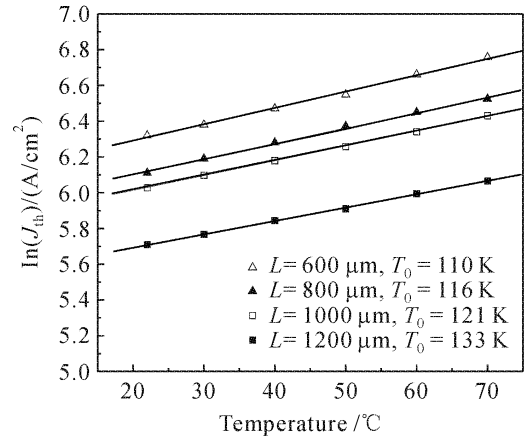


图 10 不同腔长器件的阈值电流随温度的变化

Fig. 10 Temperature dependence of the threshold current with different cavity lengths

5 结 论

通过对 808 nm 非对称波导结构无铝有源区大功率激光器光场的理论分析, 设计了非对称 n 型和 p 型波导层厚度, 用低压-金属有机化学气相外延法生长了设计的器件结构。由于光场远离 p 型区, 从而减小了光吸收和散射损耗, 使器件内损耗低至 1.0 cm^{-1} , $900 \mu\text{m}$ 腔长器件的阈值电流密度约为 400 A/cm^2 , 外微分量子效率为 81% 。与对称波导结构的无铝器件比较, 具有较高的特征温度 T_0 , $20 \sim 70^\circ\text{C}$ 范围内 T_0 值为 $110 \sim 133 \text{ K}$ 。平行结和垂直结的发散角分别为 3.0° 和 34.8° , 器件连续输出功率可达 6 W 。

参 考 文 献

- 1 P. A. Crump, T. R. Crum, M. DeVito *et al.*. High efficiency, high power 808-nm laser array and stacked arrays optimized for elevated temperature operation [C]. *SPIE*, 2004, **5336**, 144~148
- 2 Toshiro Hayakawa. High reliability in $0.8\text{-}\mu\text{m}$ high power InGaAsP/InGaP/AlGaAs laser diodes with a broad waveguide [C]. *SPIE*, 1999, **3628**, 29~37
- 3 Markus Weyers. GaAs-based high power laser diodes [C]. *Proc. 11th European workshop on MOVPE*, 2005, 273~278
- 4 Li Jianjun, Han Jun, Deng Jun *et al.*. InAlGaAs quantum well 808 nm laser diode with low threshold current and high efficiency [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1159~1162
李建军, 韩 军, 邓 军 等. 低阈值高效率 InAlGaAs 量子阱 808 nm 激光器 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1159~1162
- 5 A. Knauer, G. Erbert, R. Staske *et al.*. High-power 808 nm lasers with a super-large optical cavity [J]. *Semicond. Sci.*

- Technol.*, 2005, **20**(6):621~624
- 6 D. Z. Garbuzov, J. H. Abeles, N. A. Morris *et al.*. High power separate confinement heterostructure AlGaAs/GaAs laser diodes with broadened waveguide [C]. *SPIE*, 1996, **2682**:20~26
 - 7 D. Botez. Design considerations and analytical approximations for high continuous-wave power, broad-waveguide diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(21):3102~3104
 - 8 Iulian Petrescu-Prahova, Tom Moritz, John Riordan. High brightness 810 nm long cavity diode lasers with high d/Γ ratio in asymmetric low confinement epitaxial structure [C]. *Proceedings of the 2001 IEEE/LEOS Annual Meeting*, 2001, **1**:135
 - 9 Matthew Peters, Victor Rossin, Bruno Acklin. High efficiency, high reliability laser diodes at JDS uniphase [C]. *SPIE*, 2005, **5711**:142~151
 - 10 M. Buda, W. C. van der Vleuten, Gh. Iordache *et al.*. Low-loss low-confinement GaAs-AlGaAs DQW laser diode with optical trap layer for high-power operation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(2):161~163
 - 11 I. B. Petrescu-Prahova, M. Buda, Gh. Iordache *et al.*. High power low confinement AlCaAs/CaAs single quantum well laser diode operating in the fundamental lateral mode [C]. *CLEO/EUROPE Technical Digest*, 1994. 171
 - 12 G. Iordache, M. Buda, G. A. Acket *et al.*. High power CW output from low confinement asymmetric structure diode laser [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(2):148~149
 - 13 J. J. Lee, L. J. Mawst, D. Botez. MOCVD growth of asymmetric 980 nm InGaAs/InGaAsP broad-waveguide diode lasers for high power applications [J]. *J. Crystal Growth*, 2003, **249**(1):100~105
 - 14 Matthew Peters. Radically asymmetric wavelength-stabilized lasers reduce loss [J]. *Photonic Spectra*, 2005, **39**:106~108
 - 15 J. K. Wade, L. J. Mawst, D. Botez *et al.*. High continuous wave power, 0.8 μm -band, Al-free active-region diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(2):149~151
 - 16 Yang Jinhua, Ren Dacui, Zhang Jianjia *et al.*. Study on optical characteristics of InGaAsP/GaAs SQW lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):687~690
杨进华,任大翠,张剑家等. InGaAsP/GaAs 单量子阱半导体激光器光学特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8):687~690
 - 17 Jun Wang, Barry Smith, Xiaomin Xie *et al.*. High-efficiency diode lasers at high output power [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(11):1525~1527
 - 18 L. J. Mawst, A. Bhattacharya, L. Lopez *et al.*. 8 W continuous wave front-facet power from broad-waveguide Al-free 980 nm diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(11):1532~1534
 - 19 L. J. Mawst, A. Bhattacharya, M. Nesnidal *et al.*. MOVPE-grown high CW power InGaAs/InGaAsP/InGaP diode lasers [J]. *J. Crystal Growth*, 1997, **170**(1):383~389
 - 20 Milind R. Gokhale, J. Christopher Dries, Pavel V. Studenkov *et al.*. High-power high-efficiency 0.98- μm wavelength InGaAs-(In) GaAs (P)-InGaP broadened waveguide lasers grown by gas-source molecular beam epitaxy [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(12):2266~2276
 - 21 D. Z. Garbuzov, R. J. Menna, R. U. Martinelli *et al.*. High power continuous and quasi-continuous wave InGaAsP/InP broad-waveguide separate confinement-heterostructure multiquantum well diode lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(19):1635~1636
 - 22 J. K. Wade, L. J. Mawst, D. Botez *et al.*. 6.1 W continuous wave front-facet power from Al-free active-region ($\lambda = 805 \text{ nm}$) diode lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(1):4~6
 - 23 Manijeh Razeghi. High-power laser diodes based on InGaAsP alloys [J]. *Nature*, 1994, **369**(6482):631~633
 - 24 Dmitry Z. Garbuzov, N. Yu. Antonishkis, A. D. Bondarev *et al.*. High-power 0.8 μm InGaAsP-GaAs SCH SQW lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **QE-21**(6):1531~1536
 - 25 Bo Baoxue, Zhu Baoren, Zhang Baoshun *et al.*. LPE of InGaAsP/GaAs semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(1):21~24
薄报学,朱宝仁,张宝顺等. InGaAsP/GaAs 单量子阱 SCH 半导体激光器的液相外延[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(1):21~24
 - 26 Gao Xin, Qu Yi, Bo Baoxue *et al.*. 808 nm high power semiconductor lasers with high characteristic temperature [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1999, **20**(6):388~389,392
高欣,曲轶,薄报学等. 具有高特征温度的 808 nm 大功率半导体激光器[J]. *半导体光电*, 1999, **20**(6):388~389,392
 - 27 H. Wenzel, F. Bugge, G. Erbert *et al.*. High-power diode lasers with small vertical beam divergence emitting at 808 nm [J]. *Electron. Lett.*, 2001, **37**(16):1024~1026