

文章编号: 1001-4322(2011)01-0035-04

# 808 nm 大功率半导体激光器阵列的优化设计\*

杨 晔<sup>1,2</sup>, 刘 云<sup>1</sup>, 秦 莉<sup>1</sup>, 王 焯<sup>1,2</sup>, 梁雪梅<sup>1,2</sup>, 李再金<sup>1,2</sup>,  
胡黎明<sup>1,2</sup>, 史晶晶<sup>1,2</sup>, 王 超<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 激发态物理重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘 要:** 采用激励波长为 808 nm 的 GaAs/AlGaAs 梯度折射率波导分别限制单量子阱结构外延片, 制备了沟道深度不同的半导体激光器阵列, 并对载流子分布进行理论分析和模拟。理论和实验结果表明: 引入脊形台面和隔离沟道后, 激光器阵列的输出功率、电光转换效率、斜率效率和光谱特性均有显著提高。随着沟道的加深, 对电流侧向扩散的限制作用增强, 从而提高了阵列性能。

**关键词:** 半导体激光器 线阵列; 隔离沟道; 腐蚀深度; 电流扩散; 电流分布

中图分类号: TN248.4 文献标志码: A doi: 10.3788/HPLPB20112301.0035

808 nm 大功率半导体激光器阵列直接或作为 Nd:YAG 等固体激光器的泵浦源间接地广泛应用于材料加工、激光显示、医疗、通信及国防等领域<sup>[1-5]</sup>。随着半导体激光器泵浦固体激光器技术(DPSSL)的迅速发展, 作为泵浦源的半导体激光器在各方面的性能要求不断提高, 更高的电光转换效率、更长的使用寿命和良好的工作稳定性成为半导体激光器发展的方向。通常半导体激光器线阵列由多个条形谐振腔组成, 各发光单元之间存在着很强的电流扩散和光子耦合, 如果不进行隔离限制, 会降低器件性能, 一般通过刻蚀隔离沟道、杂质扩散、质子轰击或二次外延等方法制备横向光电隔离结构<sup>[5]</sup>。其中, 在各发光点之间刻蚀隔离沟道的方法具有良好的横向光电限制效果, 工艺简单, 利于重复, 成品率高, 被研究者们广泛接受。由于隔离沟道的形状、深度等对激光器阵列性能有较大的影响, 是隔离沟道设计和制备过程中必须考虑的参数, 然而目前相关的理论分析和实验研究却鲜有报道。本文设计了具有脊形台面和隔离沟道结构的半导体激光器阵列, 对器件的电流分布进行了数值模拟和理论分析, 并采用梯度折射率波导分别限制单量子阱结构(GRIN-SCH-SQW)的 GaAs/AlGaAs 材料, 制备了具有不同沟道深度的半导体激光器线阵列。通过比较引入脊形台面和隔离沟道前后及不同沟道深度阵列的阈值电流、输出功率、电光转换效率、光谱特性等, 证明了隔离沟道的引入和加深可以有效阻止载流子的扩散, 并可以增强对光子的限制, 从而提高半导体激光器阵列的光电特性。

## 1 理论设计

图 1 为激励波长为 808 nm 的 GaAs/AlGaAs GRIN-SCH-SQW 器件结构及导带示意图。理论计算表明, 单量子阱结构可以有效降低阈值电流密度, 而折射率渐变的波导和光电分别限制型结构, 弥补了单量子阱光模限制因子小的缺点, 既控制了光场的纵向扩散, 又可以有效地收集载流子<sup>[4, 6-8]</sup>。

我们设计的半导体激光器线阵列为具有 19 个发光点的标准 1 cm 板条, 发光单元周期为 500 μm, 每个发光单元的发光宽度为 150 μm, 填充因子为 30%。为了进行横向光电限制, 我们设计了具有脊形台面和隔离沟道的线阵列结构。通过理论分析和模拟, 比较了未经处理的条形结构(图 2(a))与引入台面和隔离

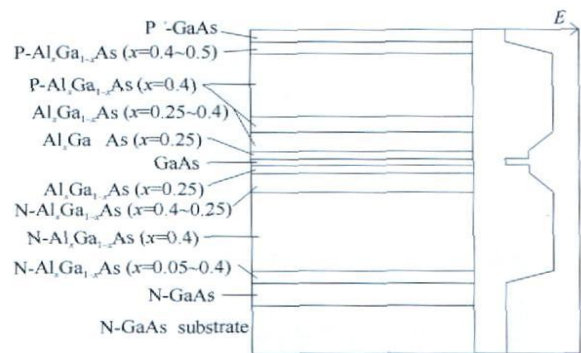


Fig. 1 Schematic structure of GaAs/AlGaAs GRIN-SCH-SQW laser

图 1 GaAs/AlGaAs 梯度折射率波导分别限制单量子阱结构的激光器结构及导带示意图

\* 收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-08-24

基金项目: 吉林省科技厅重大项目(20096013, 20086011); 吉林省科技厅科技攻关项目(20095004)

作者简介: 杨 晔(1982), 女, 博士研究生, 从事大功率半导体激光器阵列的设计与制备方面的研究; phyangy@gmail.com。

通信作者: 刘 云, hx5252@sohu.com。

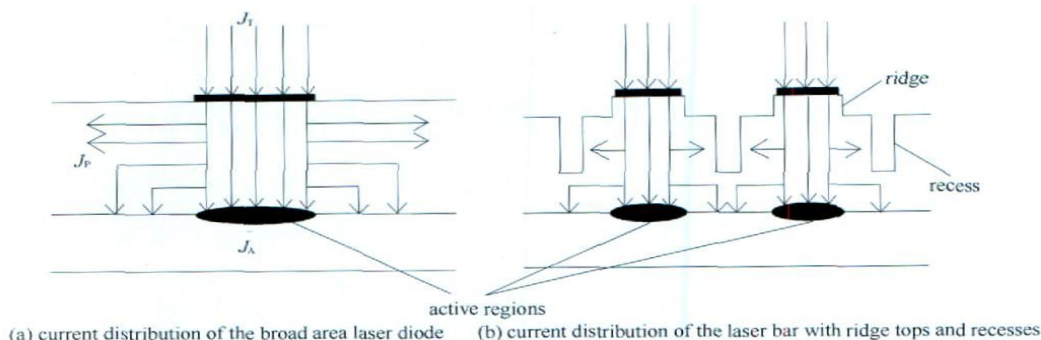


Fig. 2 Schematic diagram of current expansion

图 2 电流扩展原理示意图

沟道结构(图 2(b))的半导体激光器光电限制能力。图 3 为对两种不同结构器件的单个发光单元一半的有源区内横向电流密度分布的模拟结果。从电流密度的分布曲线可以看出,在 0~70 μm 之间,即发光条之内,两种结构的器件注入到有源区的电流密度基本相等;在 75 μm 附近,即台面边缘附近,相对于条形结构,具有台面和沟道的器件注入到有源区的载流子密度更高;而在 85~150 μm 之间,即发光条之外,具有台面和沟道的器件注入到有源区内的载流子浓度要低于条形结构的器件。这说明具有台面和沟道能够更有效地使载流子注入到发光条宽度之内的有源区之中,从而减少了载流子横向的扩散。这种对载流子密度分布的影响主要体现在发光区域的边缘,主要是由于沟道在距离发光中心较远的位置。根据电流扩展原理<sup>[5]</sup>及进一步的理论分析,我们设计台面宽度为 150 μm,深度穿过 GaAs 盖层;隔离沟道位于两个发光点中间,宽度 30 μm,深度在有源层之上。

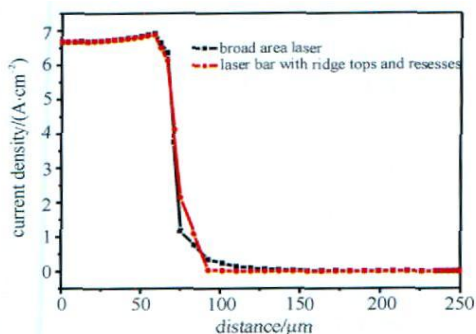


Fig. 3 Lateral current density distribution of the broad area laser and the laser bar with ridge tops and recesses

图 3 条形结构与具有台面和沟道结构的半导体激光器有源区内横向电流密度分布图

## 2 器件制备

根据横向光电限制结构的不同,制备了 3 种板条,分别是条形结构、具有相同台面结构的浅沟道结构和深沟道结构。3 种板条在相同条件下进行光刻和腐蚀,分别选用  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}_2$  系和  $\text{Br}_2/\text{HBr}$  系腐蚀液进行台面和沟道的制备,经过对腐蚀液配比的优化,获得了表面平整、深度可控的腐蚀条件。图 4 为不同样品的扫描电子显微镜(SEM)结果。其中图 4(a)为 40 000 倍率下的脊形台面截面图,台面高度为 0.4 μm,对应外延片中过 GaAs 重掺杂层到上限制层之中的位置;图 4(b), (c) 分别为 3 500 倍率下的浅、深隔离沟道,深度分别为 0.6 μm 和 1.0 μm,分别对应外延片中上限制层之中距有源区 0.4 μm 和刚好在有源区之上的位置。之后淀积  $\text{SiO}_2$ , 光刻腐蚀出条形电极窗口,在 P 面和 N 面分别制备 Ti/Pt/Au 电极和 Au/Ge/Ni 电极,蒸镀正反腔面膜,高反膜和增透膜的反射率分别为 98% 和 5%,解理成长 1 mm 的管芯。检测挑选后将管芯烧结在两片无氧铜热沉之间,将两片热沉分别接正负电极进行测量,以比较 3 种不同结构半导体激光器线阵列的性能。

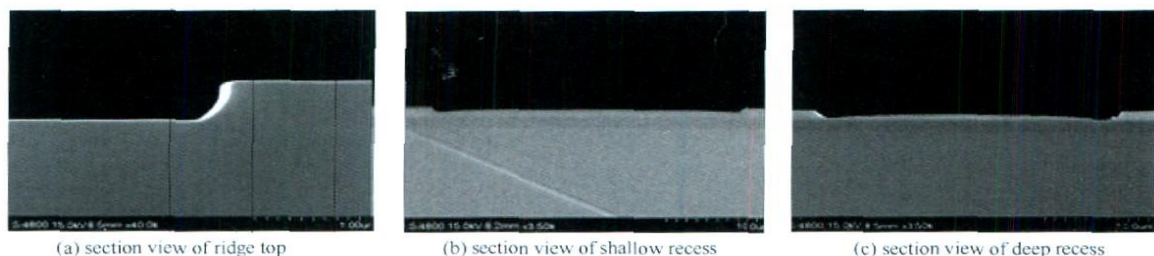


Fig. 4 SEM images of the samples

图 4 不同样品的扫描电子显微镜结果

### 3 结果分析

室温下,在占空比为 0.1% ( $t = 50 \text{ s}, f = 20 \text{ Hz}$ ) 的脉冲电流条件下对条形、浅沟道和深沟道 3 种结构的阵列进行测试。图 5 为功率、电光转换效率随电流的变化曲线。从图中可以看出,引入浅、深隔离沟道后,激光器的阈值电流从条形结构的 14.3 A 分别降低到 11.5 A 和 10.4 A。输入电流为 90 A 时,浅、深沟道结构的阵列输出功率分别为 51 W 和 59 W,均明显高于条形结构的 48 W。3 种结构器件的斜率效率按照深沟道、浅沟道和条形结构的顺序从高到低依次为 0.74, 0.65 和 0.63 W/A。通过计算得到的 3 种结构不同电流下的电光转换效率曲线,其中具有深沟道的阵列效率最高。3 种结构阵列的最高电光转换效率均出现在注入电流为 40 A 时,深沟道和浅沟道结构的效率分别为 15.5% 和 13.8%,而条形结构的效率仅为 12.2%。

图 6 所示为 3 种结构阵列在脉冲电流为 50 A 时的光谱特性,可以看到,3 种结构的器件中心波长都在 800 nm 附近,但条形结构器件光谱较宽,半高宽为 4.4 nm,且出现两个发光峰,而引入深、浅隔离沟道的阵列光谱的半高宽分别为 2.3 nm 和 2.6 nm,这说明隔离沟道的引入可以使半导体激光器的光谱窄化,且深隔离沟道结构的光谱窄化作用较之浅隔离沟道更为明显。

利用电流扩散理论可以解释以上结果。条形激光器的电流分布如图 2(a) 所示,当总电流  $J_T$  注入到器件中时,分为正对电极流入有源区的电流  $J_A$  和造成电光损耗的流入无源区的电流  $J_P$  两部分<sup>[5]</sup>。总电流  $J_T$  的分布情况

$$J_T = J_A + 2J_P \tag{1}$$

而流入到无源区内的  $J_P$  可以表示为

$$J_P = \left( \frac{2LJ_A}{vRw} \right)^{1/2} \tag{2}$$

式中: $L$  和  $w$  分别为接触电极的条长和条宽; $R$  是方块电阻; $v = e/k_B T$ ,与常数 (1~2)、电子电量  $e$ 、玻耳兹曼常数  $k_B$  和绝对温度  $T$  有关。

从式(2)可以看出,当采用相同结构的外延片时,若激光器的条长和条宽一定, $J_P$  正比于  $J_A^{1/2}$ ,即若增大注入到有源区的电流,扩散到无源区的电流也将增大,这将引起更多的载流子非辐射复合,电光损耗增大,导致激光器性能下降。

通过脊形台面和隔离沟道对电流进行横向限制后,电流的侧向扩散得到了较好地控制,大部分电流直接注入到有源区内,提高了载流子的复合率(图 2(b))。侧向扩散电流的减少,直接导致激光器内部损耗的降低,从而达到降低器件阈值电流、提高输出功率和电光转换效率的目的。同时,光子也被限制在发光条宽附近,从而减小了光谱的半高宽。根据以上电流扩散理论,可以得出,隔离沟道加深可以加强对注入有源区的电流限制作用。

### 4 结论

本文对 808 nm 大功率半导体激光器阵列结构进行了优化设计,对器件的电流分布进行了数值模拟和理论分析,为了限制电流的侧向扩散,在各发光单元之间引入脊形台面和隔离沟道。选用 GaAs/AlGaAs 梯度折射率波导分别限制单量子阱结构的外延片,制备了条形结构和具有不同深度沟道的大功率半导体激光器阵列,对器件的光电特性进行了测量和比较。理论和实验结果表明:隔离沟道的引入和加深,有效地减少了载流子的

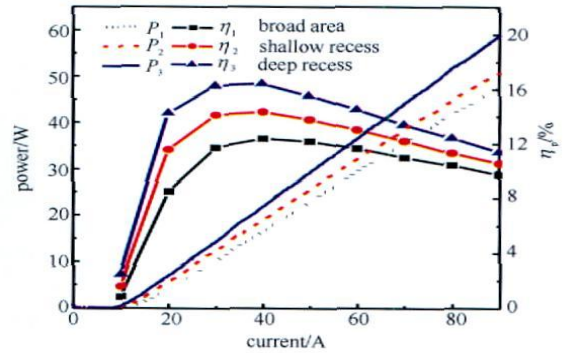


Fig. 5  $P$ - $I$  and  $\eta$ - $I$  curves of the broad area laser and the laser bars with shallow recess and deep recess

图 5 条形、浅沟道和深沟道 3 种结构不同电流下的功率及电光转换效率曲线

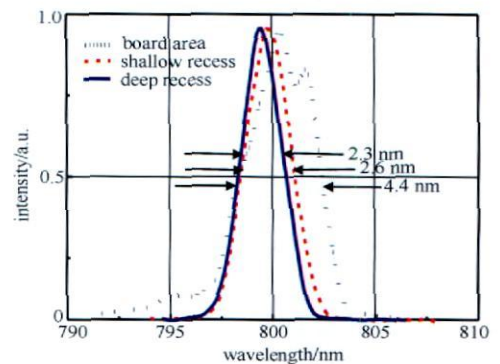


Fig. 6 Spectra of the broad area laser bar and the laser bar with shallow recess and deep recess

图 6 条形、浅沟道和深沟道 3 种结构的光谱图

扩散,增强了对光子的限制,使激光器性能显著提高。

### 参考文献:

- [1] 李再金,胡黎明,王焯,等. 808 nm 高占空比大功率半导体激光器阵列[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(11): 1615-1618. (Li Zaijin, Hu Liming, Wang Ye, et al. High power high duty-cycle 808 nm wavelength laser diode. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1615-1618)
- [2] H Isewede R, Schulze H, Sebastian J, et al. High reliable high power AlGaAs/GaAs 808 nm diode laser bars[C]//Proc of SPIE. 2007: **645607**.
- [3] König H, Gröninger G, Brick P, et al. Brilliant high power laser bars for industrial applications[C]//Proc of SPIE. 2008: **687616**.
- [4] 薄报学,高欣,王玲,等. 808 nm 波长高功率阵列半导体激光器[J]. 中国激光, 2001, **A28**(6): 494-496. (Bo Baoxue, Gao Xin, Wang Ling, et al. 808 nm wavelength high power semiconductor laser arrays. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(6): 494-496)
- [5] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002: 94-97, 262-267. (Jiang Jianping. Semiconductor laser. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 94-97, 262-267)
- [6] Hwang R Y, Luh S W, Hsu J K, et al. Critical comparison of DH, SCH, and GRIN-SCH-SQW 780 nm ridge waveguide lasers[C]//Proc of SPIE. 1992, **1813**: 178-184.
- [7] Zhu Donghai, Wang Zhanguo, Liang Jiben, et al. High power GRIN-SCH lasers with low threshold current density and high efficiency[C]//Proc of SPIE. 1996, **2886**: 108-111.
- [8] Qu Yi, Bo Baoxue, Gao Xin, et al. High power single quantum well array semiconductor lasers[C]//Proc of SPIE. 2000, **4086**: 132-134.

## Design of 808 nm high power diode laser bars

Yang Ye<sup>1,2</sup>, Liu Yun<sup>1</sup>, Qin Li<sup>1</sup>, Wang Ye<sup>1,2</sup>, Liang Xuemei<sup>1,2</sup>, Li Zaijin<sup>1,2</sup>,  
Hu Liming<sup>1,2</sup>, Shi Jingjing<sup>1,2</sup>, Wang Chao<sup>1</sup>, Wang Lijun<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Excited States Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** Laser bars with 808 nm wavelength are designed and fabricated based on GaAs/AlGaAs graded-index waveguide separate confinement hetero structure single quantum well chip. The enhancement in output power, electro-optical conversion efficiency, slope efficiency and spectral properties has been observed in the laser bars with ridge tops and recesses, which can limit the injection current into the active region. The restrictions in lateral diffusion of the current are enhanced with the deepening of the recess, thus improving the electro-optical properties of the bars.

**Key words:** semiconductor laser bar; recess; etching depth; current expansion; current distribution