

文章编号: 0258-7025(2004)05-0535-03

# 940 nm 高功率半导体激光器研究

万春明, 薄报学, 曲 轶, 姜会林

(长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要** 报道了一种采用大光学腔结构的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱高功率半导体激光器。在量子阱能级本征值方程的数值求解基础上, 优化了 InGaAs 阱层材料的 In 组份含量; 采用大光学腔结构以有效降低垂直于结平面方向的光束发散角及腔面的光功率密度, 实现器件的高功率、低发散角光。设计的激光器外延结构采用分子束外延(MBE)方法生长, 成功获得具有较低激光阈值的 940 nm 波长激光器外延片。对 100  $\mu\text{m}$  条形, 1000  $\mu\text{m}$  腔长的制备器件测试表明, 器件的最大连续输出功率达到 2 W, 峰值波长为 939.4 nm, 远场水平发散角为  $10^\circ$ , 垂直发散角为  $30^\circ$ 。器件的阈值电流为 300 mA。

**关键词** 激光技术; 高功率; 分子束外延; 半导体激光器

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## 940 nm High Power Semiconductor Laser

WAN Chun-ming, BO Bao-xue, QU Yi, JIANG Hui-lin

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University  
of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** InGaAs/GaAs/AlGaAs material high power diode lasers with large optical cavity (LOC) have been reported. Based on the solution to the intrinsic equation of quantum well energy level, In content of the InGaAs quantum well layer was optimized; the output beam divergence and optical power density on facets were reduced effectively by using LOC structure for high power, low beam divergence output. The designed 940 nm wavelength laser structure has been obtained by successful molecular beam epitaxy (MBE) growth with a low threshold current. The finally prepared devices reached up to 2 W power output with a low threshold current of 300 mA. The beam divergence of  $\theta_{//}$  and  $\theta_{\perp}$  is  $10^\circ$  and  $30^\circ$  respectively and the peak wavelength of the lasing devices is 939.4 nm.

**Key words** laser technique; high power; molecular beam epitaxy (MBE); semiconductor lasers

## 1 引 言

利用 940 nm 半导体激光器作为 Yb:YAG 固体激光器的抽运源已经成为研究的热点, 这主要是因为 Yb:YAG 固体激光器的发射波长为 1030 nm, 倍频之后产生 515 nm 的激光, 与氩离子激光器的发射波长(514 nm)很接近, 可以替代氩离子激光器。另外, 由于 Yb:YAG 激光晶体的吸收谱很宽, 对抽运半导体激光器的波长容差范围大, 所以高功率 940 nm 半导体激光器的研制具有重要的意义。InGaAs 应变量子阱激光器是因为 InGaAs 降低了表面复合速率, 防止了端面的光学损伤。这使激光

器在性能方面得到了改善和提高, 如阈值电流密度变得更低、增益系数更高、温度敏感性更小, 更适合制备高功率和长寿命的半导体激光器。国外在 940 nm 波长左右半导体激光器的研制方面, 单管激光器在腔长为 2 mm 时, 条宽为 100  $\mu\text{m}$  连续输出功率为 3 W<sup>[1]</sup>。

## 2 940 nm 应变量子阱激光器的设计

### 2.1 波长控制

对晶格匹配的量子阱激光器, 其激射波长主要受到阱、垒材料和量子阱宽度的影响。半导体量子

收稿日期: 2003-01-13; 收到修改稿日期: 2003-04-28

作者简介: 万春明(1959—), 男, 教授, 博士, 主要从事半导体激光理论教学与科研工作。E-mail: wcm@cust.edu.cn

阱激光器通常的 TE 模激励主要由第一子带到重空穴的跃迁决定。第一子带到重空穴的跃迁的光子能量表示为

$$h\nu = E_g + E_{c1}(L_z) + E_{hh1}(L_z) \quad (1)$$

其中,  $E_g$  为阱材料的禁带宽度,  $E_{c1}$  为电子第一子带能级,  $E_{hh1}$  为空穴第一子带能级,  $L_z$  为量子阱宽。

对有限深势阱, 当阱间电子波函数不发生重叠时, 决定子带能级的本征值方程为

$$\sqrt{\frac{m_b^* (V_0 - E_i)}{m_w^* E_i}} = \tan\left(\sqrt{\frac{m_w^* E_i L_z^2}{2\hbar^2}}\right) \quad (2)$$

其中  $m_b^*$  和  $m_w^*$  分别为垒和阱载流子有效质量,  $E_i$  和  $V_0$  为载流子能量本征值和势阱深度,  $\hbar$  为普朗克常数除以  $2\pi$ 。

在 InGaAs/GaAs 应变量子阱激光器中, 双轴应力破坏了晶格材料的立方对称性, 在平行于结平面方向, 晶格常数比原来的要小, 在垂直方向晶格常数则被拉长。晶格对称性的变化将导致能带结构的变化<sup>[2]</sup>。In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs 应变量子阱结构的跃迁能量是量子阱宽度和  $x$  的函数,  $x$  是 In 的组份。只考虑  $1e-1hh$  的跃迁, 方程(1) 中将增加一项由于应变导致的重空穴价带边向高能方向的移动  $\Delta E_{hh}(x)$ , 即

$$E(x, L_z) = E_g(x) + \Delta E_{hh}(x) + E_{c1}(L_z) + E_{hh1}(L_z) \quad (3)$$

对应跃迁能量的波长为

$$\lambda(x, L_z) = hc/E(x, L_z) \quad (4)$$

其中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速。

300 K 时 InGaAs 带隙与 In 组份的关系为<sup>[3]</sup>

$$E_g = 1.424 - 1.614x + 0.54x^2 \quad (5)$$

应变导致的重空穴能量移动为<sup>[4]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta E_{hh} &= \delta\epsilon_h - \frac{1}{2}\delta\epsilon_s \\ \delta\epsilon_h &= 2a_1 e_0 (c_{11} - c_{12}) / c_{11} \\ \delta\epsilon_s &= a_2 e_0 (c_{11} + 2c_{12}) / c_{12} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $c_{11}$  和  $c_{12}$  为弹性系数,  $a_1$  和  $a_2$  分别为流体净压力和切向形变势。

所有参数均可以由表 1 中 InAs 和 GaAs 材料的线性插值得到。对于应变量子阱,  $E_{c1}(L_z)$  和

表 1 InAs 和 GaAs 材料与应变相关的材料参数

Table 1 Strain relative material parameters of InAs & GaAs materials

Constant	$a/\text{\AA}$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{44}$	$a_1/\text{eV}$	$a_2/\text{eV}$
GaAs	5.6533	11.88	5.38	5.95	-7.1	-1.7
InAs	6.0583	8.33	4.53	3.96	-5.9	-1.8

$E_{hh1}(L_z)$  由(3) 式求得, 其中阱深为

$$\Delta E_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta E_g} [E_g(\text{GaAs}) - E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) - \Delta E_{hh}(x)] \quad (7)$$

$$\Delta E_v = \left(1 - \frac{\Delta E_c}{\Delta E_g}\right) [E_g(\text{GaAs}) - E_g(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}) - \Delta E_{hh}(x)] \quad (8)$$

其中  $\Delta E_c/\Delta E_g$  为导带不连续比, 取值为 0.65。

当 In 组份增加时,  $E_g$  减小, 量子阱的发射波长也增大, 并超过 GaAs 的  $0.87 \mu\text{m}$ 。考虑到 InGaAs 作为势阱和载流子的限制作用, 一般选取 In 组份为 0.13 左右, 阱宽为  $5\sim 7 \text{ nm}$ 。

## 2.2 发散度的改进

为了实现较小的垂直发散角, 就得使近场光在垂直结平面方向扩展得更大一些。该光斑尺寸的增大又可进一步减小出光面的光功率密度, 从而为实现大功率输出和延长使用寿命起到很好的作用。

采用大光腔波导结构来实现较小的垂直发散角。即增大波导层厚度来提高腔面的等效光斑尺寸, 其结构示意图如图 1 所示。图 2 为  $940 \text{ nm}$  应变量子阱激光器能带结构示意图。采用这样的结构, 既可以降低激光器的垂直发散角, 又可以不牺牲激光器的效率和不影响激光器的阈值电流密度。

## 3 应变量子阱材料的分子束外延生长

采用图 1 所示的大光腔结构进行外延生长, 这种结构的激光器几乎所有的光都集中在光波导内, 这对减少内部损耗非常有利。其典型的外延生长参数如表 2 所示。

其中 AlGaAs 的生长温度为  $700^\circ\text{C}$ , GaAs 的生长温度为  $600^\circ\text{C}$ , InGaAs 生长温度为  $550^\circ\text{C}$ 。生长

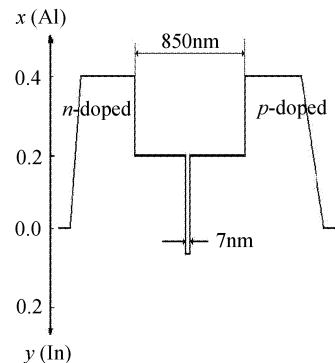


图 1 大光腔结构  $940 \text{ nm}$  应变量子阱激光器结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of  $940 \text{ nm}$  strained QW LOC structure lasers

过程中衬底不停地旋转, 保证外延生长的均匀性。GaAs 的生长速率为  $1 \mu\text{m/h}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的生长速率由 GaAs 的生长速率和  $x$  值而定。渐变层可以方便地通过线性改变 Al 源炉的温度得以改变。

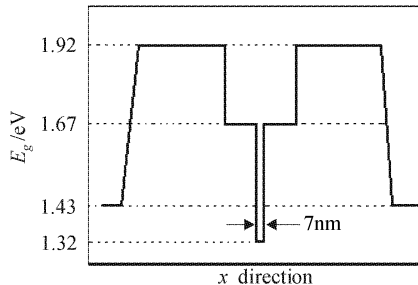


图 2 940 nm 应变量子阱激光器能带结构示意图

Fig. 2 Schematic energy band gap diagram of 940 nm strained QW structure lasers

表 2 大光腔结构应变量子阱激光器各层参数图

Table 2 Parameters of LOC structure strained QW lasers

$p^{++}$ -GaAs ohm contact layer	10 nm	Be; $2\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
$p^+$ -GaAs cap layer	200 nm	Be; $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
$p$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0.4$ )	1300 nm	Be; $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$i$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0.2$ )	420 nm	No-doped
$i$ -InGaAs potential well	7 nm	No-doped
$i$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0.2$ )	420 nm	No-doped
$n^+$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0.4$ )	1300 nm	Si; $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$n^+$ - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ( $x = 0 \rightarrow 0.4$ )	200 nm	Si; $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$n^+$ -GaAs buffer	500 nm	Si; $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
$n^+$ -GaAs substrate		Si; $1 \rightarrow 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

#### 4 940 nm 应变量子阱激光器的特性

在分子束外延(MBE)生长过的外延材料表面利用电子束蒸发淀积一层约 150 nm 厚的  $\text{SiO}_2$  绝缘层, 通过光刻使接触条宽  $100 \mu\text{m}$ ; 之后在 P 面蒸镀 Au-Zn-Au, N 面蒸镀 Au-Ge-Ni-Au, 制作激光器的接触电极。之后解理成腔长为 1.0 mm 的激光器芯片。在两腔面分别蒸镀  $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$  高反膜(HR)和增透膜(AR), 反射率分别  $\geq 95\%$  和  $5\%$ 。解理成单个器件后用 In 焊 P 面朝下倒装于无氧铜热沉上。

利用高功率半导体激光器综合测试仪对器件进行了测试。典型器件室温时的 V-I 曲线, P-I 曲线如图 3 所示, 器件室温时连续输出功率达到 2 W 时光谱图如图 4 所示, 远场光束发散角如图 5 所示。从图中可知, 器件的连续输出功率达到 2 W, 阈值电流为 300 mA。器件的发射波长为 939.4 nm, 光束水平发散角为  $10^\circ$ , 垂直发散角为  $30^\circ$ 。通过老化试验, 器件在输出功率 2 W 时的寿命大于 3000 h。

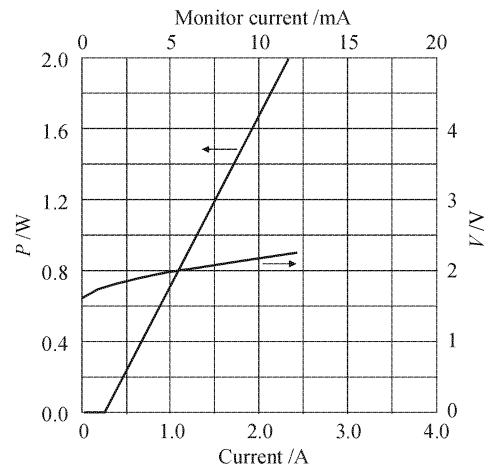


图 3 940 nm 半导体激光器的 P-I, I-V 曲线

Fig. 3 P-I and I-V characteristics of the 940 nm laser

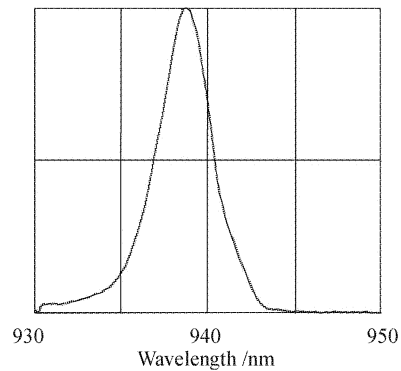


图 4 940 nm 半导体激光器的典型光谱图

Fig. 4 Lasing spectrum of the laser array at 2 W (CW)

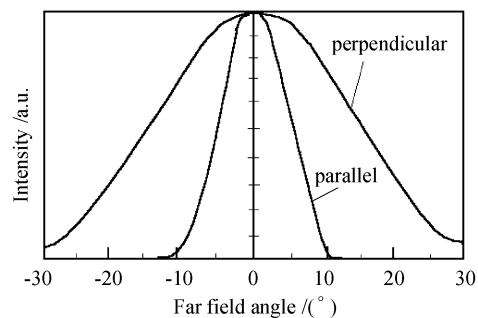


图 5 器件在 2 W 时的远场发散角图

Fig. 5 Far field patterns of parallel and perpendicular to the junction plane at 2 W

#### 参 考 文 献

- 1 G. Erbert, G. Beister, F. Bugge *et al.*. Performance of 3 W/100  $\mu\text{m}$  stripe diode lasers at 950 nm and 810 nm [C]. *SPIE*, 2001, **4287**:93~102
- 2 E. P. O'Reiley, A. R. Adams. Band-structure engineering in strained semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(2):366~379
- 3 R. M. Kolbas, N. G. Anderson, W. D. Laidig *et al.*. Strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs photopumped and current injection lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(8):1605~1613
- 4 W. W. Chow, S. W. Koch, M. Sargent III. Semiconductor Laser Physics [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994