

文章编号: 0258-7025(2006)09-1159-04

低阈值高效率 InAlGaAs 量子阱 808 nm 激光器

李建军, 韩军, 邓军, 邹德恕, 沈光地

(北京工业大学 北京光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要 以 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{InAlGaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 压应变量子阱代替传统的无应变量子阱作为有源区, 实现降低 808 nm 半导体激光器的阈值电流, 并提高器件的效率。首先优化设计了器件结构, 并利用金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 进行了器件的外延生长。通过优化外延生长条件, 保证了 5.08 cm 片内的量子阱 (QW) 光致发光 (PL) 光谱峰值波长均匀性达 0.1%。对于条宽为 50 μm , 腔长为 750 μm 的器件, 经镀膜后的阈值电流为 81 mA, 斜率效率为 1.22 W/A, 功率转换效率达 53.7%。变腔长实验得到器件的腔损耗仅为 2 cm^{-1} , 内量子效率达 90%。结果表明, 压应变量子阱半导体激光器具有更优异的特性。

关键词 激光器; InAlGaAs 量子阱; 金属有机物化学气相沉积

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

InAlGaAs Quantum Well 808 nm Laser Diode with Low Threshold Current and High Efficiency

LI Jian-jun, HAN Jun, DENG Jun, ZOU De-su, SHEN Guang-di

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract In order to lower the threshold current and raise the efficiency of 808 nm laser diode, traditional no strain quantum well (QW) is replaced by $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{InAlGaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ compression strain QW as the active region. The device structure is optimized firstly, then the structure is grown by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). By using the proper MOCVD epitaxial condition, the uniformity of the QW photoluminescence (PL) peak wavelength reaches 0.1%. For devices of 50 μm strip width and 750 μm cavity length after facet coating, the threshold current is as low as 81 mA, the slope efficiency is 1.22 W/A, and the wall-plug efficiency reaches 53.7%. By fitting the external quantum efficiency and the cavity length, a cavity loss of 2 cm^{-1} and internal quantum efficiency of 90% are obtained. All results show that the compression strain laser diodes have better characteristics.

Key words lasers; InAlGaAs quantum well; metal organic chemical vapor deposition

1 引言

低阈值和高效率是半导体激光器所追求的两个重要指标。阈值以下的电能没有转换为光能, 而是以热能的形式被浪费, 产生的热如果不能被有效地散发, 将会使器件特性变差甚至烧毁失效。同样, 电光转换效率 E_p 的提高也是为了尽可能地减少在相同的光输出功率 P_{out} 下热功率 P_{heat} 的产生。由定义式

$P_{\text{heat}} = P_{\text{out}}(1/E_p - 1)$ 可得, 当 E_p 从 50% 增加到 60% 时, 将会减少 50% 的热, 即 $1.5 = (1/0.5 - 1)/(1/0.6 - 1)$ ^[1]。随着量子阱 (QW) 半导体激光器的提出^[2] 及先进外延工艺金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 和分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 的迅速发展, 半导体激光器的阈值电流密度大幅降低, 且电光转换效率显著提高, 真正实现了器件的室温连续工作。

收稿日期: 2006-02-21; 收到修改稿日期: 2006-05-08

基金项目: 北京市优秀人才培养专项经费 (67002013200303) 和北京市人才强教计划——学术创新团队 (05002015200504) 资助项目。

作者简介: 李建军 (1966—), 男, 北京工业大学副教授, 博士, 主要从事半导体光电子器件的研究及其金属有机物化学气相沉积生长, 半导体器件的计算机模拟方面的研究。E-mail: lijianjun@bjut.edu.cn

在国内,大功率 808 nm 激光器线阵^[3]和叠层阵列^[4]已有报道。为了提高激光器阵列的性能,首先需要优化阵列单元的特性,进一步降低单元量子阱半导体激光器的阈值电流。在量子阱区引入适当的压应变是一有效的措施。理论计算表明^[5,6],引入适当的压应变将会改变材料的能带结构,特别是对价带的影响更大,主要体现在:1) 流体静压力导致整个价带下移;2) 由切向应力引起价带顶处轻重空穴退简并,重空穴带位于轻空穴带上方;3) 轻重空穴有效质量变为各向异性,重空穴沿平行于阱方向的有效质量减小。与非应变量子阱激光器相比,上述第二和第三两个效应将使得压应变量子阱半导体激光器的透明载流子浓度大为降低,在相同的注入载流子浓度下,峰值光增益显著提高,从而降低了器件的阈值电流密度。

本文以 InAlGaAs 压应变材料为量子阱有源区,通过优化设计波导结构,并利用金属有机物化学气相淀积优化生长材料质量,得到了低阈值和高效率的808 nm半导体激光器。

2 器件结构

半导体激光器的阈值条件可表示为

$$\alpha_m + \alpha_s + \sum_i \Gamma_i \alpha_i = \Gamma_s g_m(n), \quad (1)$$

其中 α_m 和 α_s 分别为腔面损耗和散射损耗, Γ_i 和 α_i 为光场在第 i 层的光限制因子和吸收系数, Γ_s 为光场在有源区的光限制因子, $g_m(n)$ 为注入载流子浓度 n 时有源区的峰值光增益。由(1)式可见,在腔面损耗 α_m 一定的情况下,为了降低器件的阈值,可采取的措施有:1) 降低散射损耗 α_s ; 2) 减小非增益区的吸收系数 α_i ; 3) 提高增益有源区的光限制因子 Γ_s ; 4) 增加相同注入载流子浓度 n 下的峰值光增益 g_m 。

基于上述思想,表 1 给出了经优化设计后的 808 nm 半导体激光器外延生长结构,设计时,在兼顾远场角的情况下,使有源区的光限制因子 Γ_s 尽可能大。整个结构生长在掺杂分子数浓度为 10^{18} atoms/cm³ 的 n 型 GaAs 衬底上,衬底晶向为 $\langle 100 \rangle$ 偏 $\langle 111 \rangle 2^\circ$ 。为了提高光增益 g_m , 降低器件阈值电流,采用 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.13}Al_{0.12}Ga_{0.75}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 压应变量子阱为有源区,以消除轻重空穴带在价带顶的简并^[6],并减小对增益起主要作用的重空穴带沿平行于阱方向的有效质量,从而使光增益系数增大^[5],透明载流子浓度降低。由于 Al 的分子数比 x 为 0.45 时, $Al_xGa_{1-x}As$ 将由直接带隙

材料转化为间接带隙材料,为了减小从光限制层的泄漏电流,同时兼顾对光场的限制,AlGaAs 光限制层的 Al 的分子数比取为 0.5。为了避免突变波导中异质界面带来的散射损耗,采用了 $Al_xGa_{1-x}As$ 渐变波导结构, x 从 0.3 线性渐变到 0.5。

表 1 808 nm 半导体激光器外延结构
Table 1 Epitaxial structure of the 808 nm semiconductor laser

Material	Thickness	Doping / (atoms/cm ³)
GaAs cap	200 nm	C: $10^{18} \sim 5 \times 10^{19}$
$Al_xGa_{1-x}As$	100 nm	C: 10^{18}
$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	1.6 μm	C: $10^{16} \sim 10^{18}$
$Al_xGa_{1-x}As$	100 nm	none
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	30 nm	none
InAlGaAs	10 nm	none
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	30 nm	none
$Al_xGa_{1-x}As$	100 nm	none
$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	1.8 μm	Si: $10^{16} \sim 10^{18}$
$Al_xGa_{1-x}As$	100 nm	Si: 10^{18}
GaAs buffer	200 nm	Si: 10^{18}
n^+ GaAs substrate		

针对表 1 的外延结构,利用传输矩阵法^[7]模拟得到的光场近场分布如图 1 所示,图中同时给出了波导的折射率分布,模拟中折射率参数的选取见文献[8]。由图 1 的模拟结果可以看出,光场在量子阱有源区处有最大值,尽管有波导层的限制作用,在两侧光限制层中仍有相当的光场分布。模拟表明,有 62% 的光场集中在波导层中,近 40% 的光分布在靠近波导层的限制层中。因此,为了有效减少因掺杂和自由载流子带来的光吸收损耗 α_i , 在波导层中不掺杂,同时在靠近波导层的部分光限制层中采用渐变掺杂。在 GaAs 缓冲层与 N 型 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 限制层及 GaAs 帽层与 P 型 $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ 限制层之间分

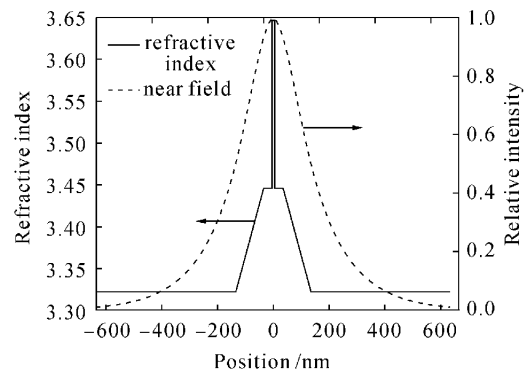


图 1 器件的模拟近场分布

Fig. 1 Near field simulation of the device

别插入了厚度为 100 nm 的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 渐变层, x 从 0 线性渐变至 0.5, 其目的是为了降低由于 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 突变带阶差引入的附加压降。

3 器件制备

根据表 1 所示的器件结构, 首先利用 EMCORE D125 LP-金属有机物化学气相淀积系统对其进行外延生长。其中 Al, Ga 和 In 的金属有机物源 (metalorganic source, MO) 分别为 TMAI, TMGa 和 TMIIn; V 族源是纯度为 100% 的 AsH_3 ; N 型和 P 型掺杂源分别为 SiH_4 和 CCl_4 , 选用 CCl_4 为 P 型掺杂剂是由于 C 在 AlGaAs 材料系中的掺杂效率高、扩散系数小且无杂质记忆效应; 载气是经钼管纯化后的 H_2 , 其露点低于 -110°C 。反应室的压力为 8000 Pa, 生长温度在 $600\sim 720^\circ\text{C}$ 之间, 生长过程中衬底在电动机的带动下以 1000 r/min 的速度高速旋转。

在材料质量能够保证的前提下, 低阈值和高效率的半导体激光器还要求量子阱有源区在片内厚度均匀且组分均匀, 以降低光散射损耗。为此, 通过调整金属有机物源在衬底片上的分布以达到厚度的均匀性, 通过控制加热系统调整衬底片上的温度分布

以达到组分的均匀性。由于厚度和组分的均匀性都将直接影响片内的量子阱带间跃迁波长均匀性, 通过光致发光 (PL) 光谱峰值波长映射图来衡量片内阱区组分和厚度的均匀性。图 2(a) 是在器件生长之前, 调整了厚度和组分均匀性之后, 在 5.08 cm 衬底上外延生长的一个量子阱的光致发光波长映射图, 其生长结构与表 1 基本相似, 只是上下光限制层的厚度分别为 200 nm 和 500 nm, 且不掺杂, 帽层的厚度为 5 nm。统计表明, 峰值波长的平均值为 798.9 nm, 标准偏差为 0.99 nm, 峰值波长的均匀性为 0.1%。图 2(b) 是相应于图 2(a) 中五点的光致发光谱线, 由图可见, 五点的峰值波长分别为 799 nm, 799.6 nm, 799.7 nm, 798.6 nm 和 797.2 nm, 这为生长高性能的器件提供了充分的保证。

外延生长结束后, 进行器件的制备。首先光刻腐蚀出 $50\ \mu\text{m}$ 条宽的台面, 再溅射 Ti/Pt/Au 制备 P 面电极; 接着片子减薄至 $100\ \mu\text{m}$, 蒸发 AuGeNi 制备 N 面电极; 然后解理成腔长为 $750\ \mu\text{m}$ 的条进行腔面镀膜, 其中高反射膜和增透膜的反射率分别为 90% 和 10%; 最后解理、烧结、压焊, 并封装在 TO3 的管座上。

4 测试结果

808 nm 半导体激光器的光电特性测试结果如图 3 所示。由图 3(a) 直流测试条件下的 $P-I$ 和 $V-I$ 关系曲线可见, 器件的阈值电流为 81 mA, 斜率效率为 1.22 W/A, 500 mA 下的光输出功率为 502 mW, 相应的压降为 1.867 V, 串联电阻为 $0.56\ \Omega$, 电光转换效率达 53.7%。由图 3(b) 的远场

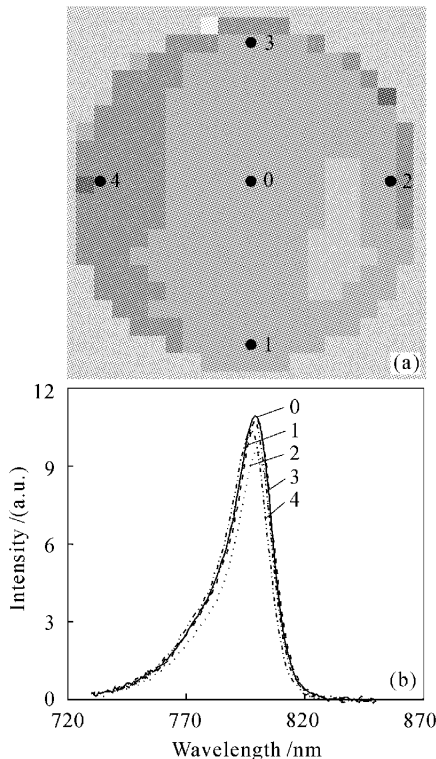


图 2 量子阱的光致发光光谱峰值波长映射图
Fig. 2 PL peak wavelength mapping of QW

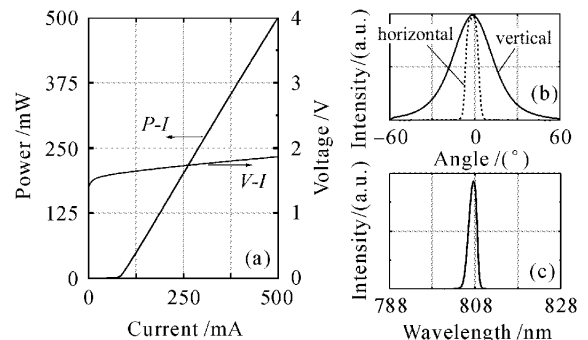


图 3 808 nm 半导体激光器的光学特性测试结果
(a) $P-I$ 特性; (b) 远场特性; (c) 光谱特性

Fig. 3 Optical characteristic of the 808 nm semiconductor laser diode
(a) $P-I$ characteristic; (b) far field pattern; (c) optical spectrum

曲线可得到水平和垂直方向的发散角分别为 9° 和 32.4° 。由图 3(c) 光谱分布曲线可见, 中心波长为 807.6 nm , 光谱半宽为 2 nm 。变腔长实验得到腔长为 $750 \mu\text{m}$, $800 \mu\text{m}$ 和 $1000 \mu\text{m}$ 时器件的斜率效率分别为 1.22 W/A , 1.2 W/A 和 1.17 W/A , 由此拟合得到总的腔损耗为 2 cm^{-1} , 器件的内量子效率为 90% 。表明器件的腔损耗很小, 且内量子效率也很高。

5 结 论

通过压应变 InAlGaAs 量子阱代替传统的 AlGaAs 非应变量子阱作为有源区来提高光增益, 并优化掺杂分布来降低光损耗, 对 808 nm 半导体激光进行了优化设计。利用金属有机物化学气相淀积系统外延生长了低阈值高效率的 808 nm 半导体激光器, 器件的光功率转换效率达 53.7% , 从而为大功率 808 nm 激光器线阵和叠层阵列的研究打下了良好的基础。

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**:144~155
- 2 Won T. Tsang. Chemical beam epitaxy [J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1988, **4**(5):18~24
- 3 Xie Hongyun, An Zhenfeng, Chen Guoying *et al.*. High duty-cycle high power semiconductor laser array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):22~24
谢红云, 安振峰, 陈国鹰 等. 高占空比大功率激光器阵列[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):22~24
- 4 Fang Gaozhan, Ma Xiaoyu, Wang Guohong *et al.*. Quasi-CW 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs stack laser diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):649~653
方高瞻, 马晓宇, 王国宏 等. 准连续 17 kW 808 nm GaAs/AlGaAs 叠层激光二极管阵列[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):649~653
- 5 Gai Hongxing, Li Jianjun, Han Jun *et al.*. Studies on the gain characteristic of the AlInGaAs/AlGaAs strain quantum well [J]. *Chinese J. Quantum Electron.*, 2005, **22**(1):85~89
盖红星, 李建军, 韩 军 等. AlInGaAs/AlGaAs 应变量子阱增益特性研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1):85~89
- 6 Shun Lien Chuang. Efficient band-structure calculations of strained quantum wells [J]. *Phys. Rev. B*, 1991, **43**(12):9649~9661
- 7 Li Jianjun, Chen Changhua, Lian Peng *et al.*. A numerical method for analyzing multi-transverse modes of a complex index waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7):800~803
李建军, 陈昌华, 廉 鹏 等. 多横模复折射率波导的数值求解[J]. *光学学报*, 2001, **21**(7):800~803
- 8 Y. Kokubo, I. Ohta. Refractive index as a function of photon energy for AlGaAs between 1.2 and 1.8 eV [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(4):2042~2043