

# 780nm InGaAsP/InGaP/AlGaAs 高功率 半导体激光器

曹玉莲<sup>1,†</sup> 廉 鹏<sup>2</sup> 王 青<sup>1</sup> 吴旭明<sup>1</sup> 何国荣<sup>1</sup> 曹 青<sup>1</sup> 宋国峰<sup>1</sup> 陈良惠<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)  
(2 北京工业大学光电子技术实验室, 北京 100022)

**摘要:** 采用 MOCVD 生长了 InGaAsP/InGaP/AlGaAs 材料系分别限制异质结构(SCH)的高功率半导体激光器. 对于厚度为 10nm 的单量子阱,通过计算量子阱增益谱优化了器件的激射波长. 在室温下外延材料的荧光峰值波长为 764nm,由于 In 原子的记忆效应(In carry-over effect)和 As/P 的替换作用使材料的 InGaP/AlGaAs 界面不陡峭,通过在 InGaP/AlGaAs 间长一层 5nm 的 GaAsP 大大改善了界面质量. 器件的阈值电流从界面改善前的 560mA 减小到改善后的 450mA,斜率效率也从 0.61W/A 提高到了 0.7W/A,特别是单面最大输出功率已经从 370mW 增加到了 940mW,发生灾变性光学损伤时的工作电流已经由原来的 1100mA 上升为 1820mA.

**关键词:** InGaP/AlGaAs; 界面; 增益; 阈值电流; 激光器

**PACC:** 4255P; 4260B

**EEACC:** 4320J

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)09-1621-04

## 1 引言

700~790nm 高功率半导体激光器在光学存储、印刷、医学、条形码技术、泵浦飞秒 Cr<sup>3+</sup> 固体激光器等方面有广泛的应用. 对于这个波段的激光器,由于 GaAs/AlGaAs 生长比较容易控制,生长技术较为成熟,常采用 AlGaAs 作为有源区. 但是由于 Al 易于氧化,使这个波段激光器的可靠性一直存在问题,特别对于波长小于 800nm 的激光器,由于有源区 Al 组分增加,使器件的寿命问题更加突出. 对于 700~900nm 这一波段的大功率激光器,目前国际上普遍使用有源区无铝的 InGaAsP/InGaP/AlGaAs(AlGaInP)材料系. 这主要是因为该材料系与有铝材料系相比,具有低的表面复合速度、小的热阻和电阻、更大的灾变性光学损伤极限<sup>[1-3]</sup>,但是 AlGaInP 和 AlGaAs 材料相比具有更大的热阻率和电阻率.

本文采用 InGaAsP/InGaP/AlGaAs 材料系制作了激射波长为 780nm 的激光器. 这种材料系的外延生长通常存在两个问题:首先是四元化合物 InGaAsP 的生长控制较为困难,特别是 P 组分相对 As 组分的控制更难. 其次,由于 In 原子的记忆效应(In carry-over effect)和 As/P 的替换作用,在外延生长时难以得到陡峭的 InGaP/AlGaAs 界面. 这与

生长 InGaP/GaAs 遇到的问题是相同的,而且不同的生长温度和源炉的开关顺序等都会对它们的界面质量产生很大的影响. 许多研究人员通过在两者间生长一层很薄的 GaP 或 GaAsP 已经成功地解决了 InGaP/GaAs 的界面问题<sup>[4]</sup>. 这里,我们通过在 InGaP/AlGaAs 间生长一层 GaAsP 过渡层也取得了陡峭的界面,同时器件的性能得到了大大的改善. 对于这个波长的激光器,采用这种材料系在国内还未见报导<sup>[5]</sup>.

## 2 材料结构与量子阱的增益计算

器件采用分别限制异质的单量子阱结构,具体结构和组分如图 1 所示. 外延结构生长顺序如下:在 n<sup>+</sup>型无偏向的 GaAs(100)衬底上先生长 0.06 $\mu$ m n<sup>-</sup>GaAs 缓冲层,然后依次生长 0.1 $\mu$ m n<sup>+</sup>型 Al<sub>0.1-0.63</sub>Ga<sub>0.9-0.37</sub>As 缓冲层;1.5 $\mu$ m 的 n<sup>+</sup>型 Al<sub>0.63-0.37</sub>Ga<sub>0.37-0.65</sub>As 下限制层,0.1 $\mu$ m n<sup>+</sup>型 Al 组分渐变层的 Al<sub>0.63-0.35</sub>Ga<sub>0.37-0.65</sub>As 层;0.2 $\mu$ m 不掺杂的下波导层 In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P;10nm 不掺杂的 InGaAsP 单量子阱层;0.2 $\mu$ m 不掺杂的上波导层 In<sub>0.49</sub>Ga<sub>0.51</sub>P;0.1 $\mu$ m 的 p<sup>+</sup>型掺 C 的 Al<sub>0.35-0.63</sub>Ga<sub>0.65-0.37</sub>As 组分渐变层;1.2 $\mu$ m 的 p<sup>+</sup>型 Al<sub>0.63</sub>Ga<sub>0.37</sub>As 层;0.2 $\mu$ m 的 p<sup>++</sup>型 GaAs 欧姆接触层.

对于 780nm 这个波长,采用 InGaAsP 材料作

† 通信作者. Email: caoyl@red.semi.ac.cn

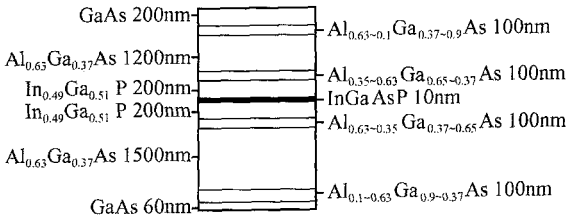


图 1 外延结构图

Fig. 1 Schematic of the SCH laser structure

为量子阱,这层材料可以是压应变的或张应变的,也可以是晶格匹配的,所以对于某一特定波长应用,在结构设计时需计算该材料增益谱,根据增益谱的峰值来优化量子阱的组分和量子阱的厚度.图 2 为 InGaAsP/InGaP 压应变单量子阱的增益谱,阱厚为 10nm,其中实线为不考虑带内弛豫的量子阱增益谱,虚线为考虑带内弛豫的量子阱增益谱.根据增益谱,可以看到选择量子阱的厚度为 10nm 是能够满足 780nm 激射波长需要的.在考虑带内弛豫时,载流子的弛豫时间取 0.1ps.增益的具体计算方法见参考文献[6],在增益计算中,我们没有考虑多体效应和能带的非抛物线效应对材料增益的影响,计算中用到的具体参数由插值方法得到.

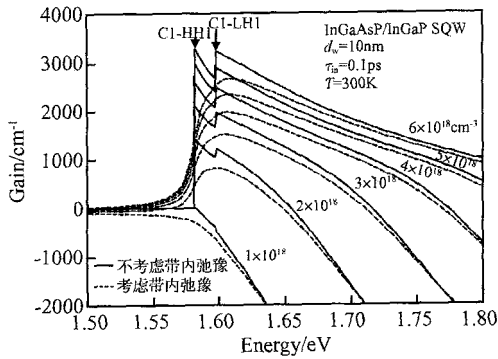


图 2 InGaAsP/InGaP 单量子阱的增益谱

Fig. 2 Gain spectra of InGaAsP/InGaP single quantum well

如果不考虑带内弛豫的影响,可以看到两个尖峰,分别对应于导带第一子能级到重空穴的第一子能级的跃迁和轻空穴的第一子能级的跃迁.同时,由于压应变导致的轻重空穴的分裂较小,当注入增加时,会发生导带到轻空穴的第一子能级的跃迁,所以器件的阈值电流可能会很大,这和器件的实际测试结果也是吻合的.当考虑带内弛豫的影响时,增益谱对应于带边或子带边的低能端都不是突然截止,而有向带隙的拖尾,谱线变得平滑,不再为原来的锯齿形,且随着注入载流子的浓度从  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  增加到  $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,峰值增益的位置向高能方向移动,同时可以看到随着注入的增加,轻空穴的增益峰值

越来越强,这是由于能带准费米能级的提升引起的.

### 3 材料的外延生长

外延片采用 MOCVD 技术生长,用  $\text{H}_2$  作为载气, $\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  作为 As 源和 P 源, TMAI, TM-Ga, TMIn 分别作为 Al, Ga 和 In 源,采用  $\text{CCl}_4$  作为 p 型掺杂剂,  $\text{SiH}_4$  作为 n 型掺杂剂, / 比大于 100. 外延片在常温下的光致发光 (PL) 谱如图 3 所示,峰值波长为 764nm,半高宽为 47nm. 外延片的 X 射线双晶衍射如图 4 所示,从图中可以看到,波导层 InGaP 与衬底的间距约为 132s,相应晶格失配度为  $5.13 \times 10^{-4}$  左右;同时根据 X 射线衍射的测试结果,通过计算得知限制层为  $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$ . 虽然 Al 组分与我们的设计有一些偏差,但从限制载流子的

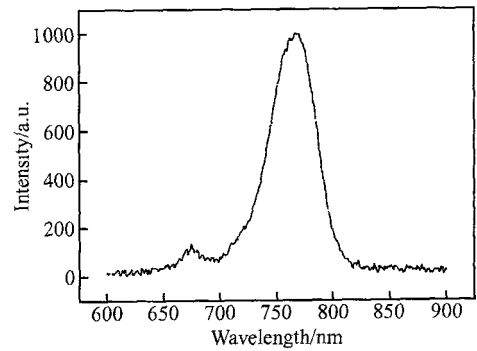


图 3 室温光致发光谱

Fig. 3 PL spectrum of the sample at room temperature

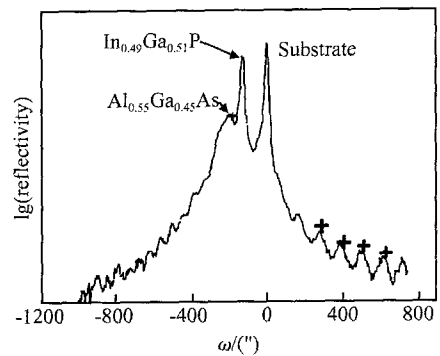


图 4 外延层 X 射线双晶衍射图

Fig. 4 XRD rocking curve of the sample

角度来看,这个组分的 AlGaAs 作为限制层材料已是足够了.图 4 中标有“+”号的小峰是由缓冲层 AlGaAs 的 Pendellosung fringes 造成的,可见外延片的质量还是很好的.使用 KOH  $\text{K}_3\text{Fe}$   $\text{H}_2\text{O}$  溶液显结后的扫描电镜照片如图 5 所示.对比图 5 (a) 和 (b),发现 AlGaAs/InGaP 界面(生长 AlGaAs 下限制层后再生长 InGaP 界面)一样陡峭、平整.但

在图 5 (a) 中,可以看到 AlGaAs/InGaP 界面要比 InGaP/AlGaAs 界面(生长 InGaP 后再生长 AlGaAs 上限制层的界面)均匀平整得多.这主要是由于 In 的记忆效应和 As/P 的替换作用污染了随后生长的 AlGaAs 层,形成了 InGaAlAs(P) (intermediate layer)<sup>[7-9]</sup>,这两者谁起主要作用和生长条件密切相关,而且生成的这层过渡层的厚度和组分不很均匀,不同的生长温度也会对其产生很大的影响.但当 5nm 厚的 GaAsP 层被插入到 InGaP 和高 Al 组分 AlGaAs 层时,如图 5 (b) 所示,可以明显地看到,(a) 图中模糊的 InGaP/AlGaAs 上界面变得十分平整、陡峭.

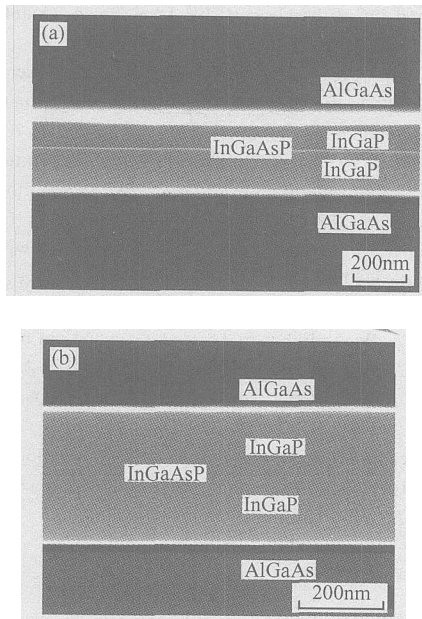


图 5 InGaP/AlGaAs 界面扫描电镜图 (a) 未插入 GaAsP 过渡层;(b) 插入 GaAsP 过渡层

Fig. 5 Cross-sectional SEM images of the samples with GaAsP (a) and without GaAsP (b) insertion layers

### 4 器件制作和结果分析

对图 5 (a) 和 (b) 的两种外延片采用相同的工艺制作单管激光器.首先为了减少载流子在侧向的扩散,使用湿法腐蚀刻出深 0.3 $\mu$ m 左右的台面,然后用 PECVD 在外延片表面沉积一层 SiO<sub>2</sub> 作为绝缘层,用标准的光刻技术在 SiO<sub>2</sub> 表面刻蚀出 100 $\mu$ m 宽的条形窗口,p 面溅射 Ti/Pt/Au,n 面减薄到 100 $\mu$ m 左右后,镀 AuGe/Ni,然后合金、解理、检测.将筛选出的管芯(未镀膜) p 面向下使用 In 焊料烧结在铜热沉上.

对腔长都为 900 $\mu$ m 的未镀膜面膜的激光器,在 CW 工作条件下进行测试,从几十只器件的对比结

果来看,插入 GaAsP 过渡层器件的各种参数相对于没有插入 GaAsP 过渡层的器件都有很大的改善.两种外延片的典型器件的输出功率与工作电流的关系如图 6 所示.从图 6 中看到插入 GaAsP 过渡层改善了 InGaP/AlGaAs 界面后,器件的性能有非常显著的改进,首先阈值电流从原来的 560mA 减小到界面改善后的 450mA,斜率效率也从 0.61W/A 提高到了 0.7W/A,特别是单面最大输出功率已经从 370mW 提高到了 940mW,是原来的 2 倍多.发生灾变性光学损伤时的工作电流已经由原来的 1100mA 变为 1820mA.器件性能的改善主要是由于插入 GaAsP 过渡层后,平整的 InGaP/AlGaAs 界面大大减少了未生长过渡层时存在的大量非辐射复合中心.由于插入的 GaAsP 过渡层很薄,所以两种器件的激光波长和垂直远场发散角几乎没有任何变化,其平均值分别为 779.5nm 和 36.5°.

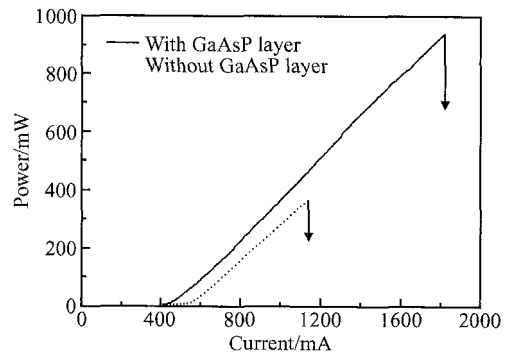


图 6 外延片典型的器件输出功率与工作电流曲线

Fig. 6 Light output curve versus DC current of the test laser sample

从器件的测试结果可以看到,即使界面改善后,其阈值电流密度相对国外无铝材料系的激光器来说还是偏高.例如, Hayakawa 等人<sup>[9]</sup>采用和我们相同的材料系,激光波长为 800nm,条宽为 50 $\mu$ m,腔长为 750 $\mu$ m 的器件的阈值电流密度为 400A/cm<sup>2</sup>,我们器件的阈值电流密度约为 450A/cm<sup>2</sup>; Erbert 等人<sup>[10]</sup>采用张应变 GaAsP 作为量子阱材料,波导层和限制层都为宽带隙的 AlGaAs 材料,激光波长为 790nm 的器件的最小阈值电流密度为 238A/cm<sup>2</sup>.通过以上对比,我们把阈值电流密度过大的原因总结如下:首先对于 InGaAsP/InGaP/AlGaAs 材料系,InGaAsP 量子阱与 InGaP 波导层的导带带阶仅为两者带隙间隔的 20% ( $E_c \sim 20\% E_g$ ),所以载流子很容易泄漏到限制层,这可能就是我们器件阈值电流密度与 Hayakawa 等人的结果相差太大的原因<sup>[11]</sup>.如果波导层也选用 AlGaAs 材料,虽然能够增加导带的带阶,减少阈值电流密度,但含 Al 的波导层材料是否会影响器件的寿命还有待进一步的研

究. 另一方面,正如前面增益谱计算所表示的,随着注入的增加,准费米能级提升,轻空穴也会参与跃迁,以上这两个原因都可能造成我们器件的阈值电流较大. 在以后的工作中,为了减少器件的阈值电流,除了在工艺中要尽量减少附加体电阻外,结构设计中,在满足激射波长的前提下,可以选用张应变的量子阱或减少量子阱的厚度来加大轻重空穴的分裂,减少电子跃迁到轻空穴的几率,相应的阈值电流就会降低<sup>[12]</sup>.

## 5 结论

本文利用 MOCVD 方法,在国内首次制作了激射波长为 780nm 的 InGaAsP/InGaP/AlGaAs 材料系的高功率半导体激光器. 通过在 InGaP 和 AlGaAs 中生长一层 5nm 厚的 GaAsP 过渡层,不仅改善了界面质量,而且减小了器件的阈值电流,提高了器件的输出功率.

## 参考文献

- [ 1 ] Wade J K, Mawst L, Botez D, et al. 0.8 $\mu\text{m}$ -band, Al-free active-region diode lasers. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(2): 149
- [ 2 ] Agahi F, Lau K M, Choi H K, et al. High-performance 770nm AlGaAs/GaAsP tensile strained quantum well laser diodes. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995(2), 7: 140
- [ 3 ] Fukunaga T. Highly reliable operation of high power InGaAsP/InGaP/AlGaAs 0.8 $\mu\text{m}$  separate confinement heterostructure lasers. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38(9B): L387
- [ 4 ] Kwon Y H, Jeong W G, Chi Y H. Effect of GaAsP interlayers on the structural, optical, and electrical characteristics of GaAs/InGaP heterojunction. *Appl Phys Lett*, 2000, 76(17): 2379
- [ 5 ] Li Zhonghui, Wang Xiangwu, Yang Jihua, et al. LP-MOVCE grown broad-waveguide Al-free active region SQW lasers. *Chinese Journal of Semiconductor*, 2001, 22(12): 1557 (in Chinese) [李忠辉, 王向武, 杨进华, 等. LP-MOVCE 生长宽波导有源区无铝单量子阱激光器. *半导体学报*, 2001, 22(12): 1557]
- [ 6 ] Guo Changzhi. *Semiconductor quantum well lasers*. Beijing: Peking University Press, 1992
- [ 7 ] Mawst L J, Rusli S, Al-Muhanna A. O. 8 $\mu\text{m}$  InGaAsP/InGaP/AlGaAs high-power single quantum well lasers with tensile-strained InGaP barriers. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1999, 5(31): 785
- [ 8 ] Tsai C Y, Moser M, Geng C. Interface characteristics of GaInP/GaAs double heterostructures grown by metalorganic vapor phase epitaxy. *J Cryst Growth*, 1994, 145: 786
- [ 9 ] Hayakawa T. High reliability and facet temperature reduction in high-power 0.8 $\mu\text{m}$  Al-free active-region diode lasers. *SPIE*, 2001, 4287: 103
- [ 10 ] Erbert G, Bugge F, Knauer A, et al. Diode lasers with Al-free quantum wells embedded in LOC AlGaAs waveguides between 715nm and 840nm. *SPIE*, 1999, 3628: 19
- [ 11 ] Oster A, Bugge F, Erbert G, et al. Gain spectra measurement of strained and strain-compensated InGaAsP-AlGaAs laser structures for 800nm. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1999, 5(3): 631
- [ 12 ] Wenzel H, Erbert G, Bugge F, et al. Optimization of GaAsP-QWs for high power diode lasers at 800nm. *SPIE*, 2000, 3947: 32

## 780nm InGaAsP/InGaP/AlGaAs High Power Semiconductor Laser

Cao Yulian<sup>1,†</sup>, Lian Peng<sup>2</sup>, Wang Qing<sup>1</sup>, Wu Xuming<sup>1</sup>, He Guorong<sup>1</sup>,  
Cao Qing<sup>1</sup>, Song Guofeng<sup>1</sup>, and Chen Lianghui<sup>1</sup>

(1 *NanoOptoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Department of Electronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*)

**Abstract:** Using metal organic chemical vapor deposition, we fabricate an InGaAsP/InGaP/AlGaAs single quantum well laser with a separate confinement heterostructure. We calculate the gain spectrum with and without the effect of interband relaxation. The peak wavelength of the PL spectrum is 764nm. Due to the In carry-over effect, the interface between InGaP and AlGaAs is not abrupt. The performance of the laser diodes into which a thin GaAsP interlayer is inserted is better than those with no such interlayer. The threshold current is decreased from 560 to 450mA, the slope efficiency is increased from 0.61 to 0.7W/A, and the output power is increased from 370 to 940mW.

**Key words:** InGaP/AlGaAs; interface; gain threshold current; laser

**PACC:** 4255P; 4260B      **EEACC:** 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2006)09-1621-04

†Corresponding author. Email: caoyl@red.semi.ac.cn