

文章编号: 0258-702X(2002)03-0193-04

# MOVPE 生长 $1.3 \mu\text{m}$ 无致冷 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器研究

马宏<sup>1</sup>, 易新建<sup>1</sup>, 金锦炎<sup>2</sup>, 杨新民<sup>2</sup>, 李同宁<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074  
<sup>2</sup> 武汉邮电科学研究院国家光电子工艺中心武汉分部, 湖北武汉 430074)

**提要** 通过低压金属有机化学气相外延(LP-MOVPE)工艺生长了 AlGaInAs 应变补偿量子阱材料, 通过 X 射线双晶衍射、光荧光、二次离子质谱的测试分析得到了材料生长的优化工艺参数, 降低了材料中的氧杂质含量, 得到了高质量 AlGaInAs 应变补偿量子阱材料, 室温光致发光半宽 FWHM = 26 meV。采用此外延材料成功制作了  $1.3 \mu\text{m}$  无致冷 AlGaInAs 应变量子阱激光器, 器件测试结果为: 激射波长:  $1290 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1330 \text{ nm}$ , 阈值电流:  $I_{\text{th}}(25^\circ\text{C}) \leq 15 \text{ mA}$ ;  $I_{\text{th}}(85^\circ\text{C}) \leq 25 \text{ mA}$ , 量子效率变化:  $\Delta\eta_{\text{ex}}(25 \sim 85^\circ\text{C}) \leq 1.0 \text{ dB}$ 。

**关键词** AlGaInAs 应变补偿量子阱, 低压金属有机化学气相外延, 无致冷

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

## Study on MOVPE Growth of $1.3 \mu\text{m}$ Uncooled AlGaInAs/InP Strain-compensated Quantum Well Lasers

MA Hong<sup>1</sup>, YI Xin-jian<sup>1</sup>, JIN Jin-yan<sup>2</sup>, YANG Xin-min<sup>2</sup>, LI Tong-ning<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> The State Key Laboratory of Laser Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074;

<sup>2</sup> Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication,

National Research Center for Optoelectronic Technology (Wuhan), Wuhan 430074)

**Abstract** AlGaInAs strain-compensated quantum wells have been grown by LP-MOVPE. By X-ray diffraction, photoluminescence and SIMS, the properties of the materials and the oxygen concentration in AlGaInAs materials are analyzed. A high quality (PL FWHM = 26 meV; room temperature) AlGaInAs strain-compensated quantum well through optimized MOVPE process is obtained. By the wafers, the  $1.3 \mu\text{m}$  uncooled AlGaInAs strain-compensated quantum well lasers have been fabricated. The results of the laser chips are:  $1290 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1330 \text{ nm}$ ,  $I_{\text{th}}(25^\circ\text{C}) \leq 15 \text{ mA}$ ,  $I_{\text{th}}(85^\circ\text{C}) \leq 25 \text{ mA}$  and  $\Delta\eta_{\text{ex}}(25 \sim 85^\circ\text{C}) \leq 1.0 \text{ dB}$ .

**Key words** AlGaInAs, strain-compensated quantum well, LP-MOVPE, uncooled

## 1 引言

温度的变化会对半导体激光器的性能产生明显的影响, 如温度升高造成阈值电流升高、量子效率降低等。然而, 无论是光接入网、光电子集成, 还是光交换、光互联, 都要求半导体激光器具有很高的温度

稳定性。因此, 如何提高半导体激光器的温度稳定性始终是一个重要的研究课题。AlGaInAs 量子阱的导带带阶 ( $\Delta E_c = 0.72\Delta E_g$ ) 大于 InGaAsP 量子阱的导带带阶 ( $\Delta E_c = 0.4\Delta E_g$ ), 高温下对电子的限制更好, 减小了高温下电子在垒层和波导层中的分布。与 InGaAsP 量子阱相比, 在高温下 AlGaInAs 量子阱

收稿日期 2000-11-29; 收到修改稿日期 2001-02-21

基金项目 国家高技术 863-307 主题资助项目(课题编号为 863-307-11-(02))

作者简介 马宏(1971—), 男, 华中科技大学光电子工程系博士生, 主要从事半导体激光器与放大器的研究。E-mail:

mahong99@yahoo.com

具有更高的微分增益,更低的俄歇复合和载流子吸收损耗,这些决定了 AlGaInAs 量子阱激光器具有高温、高速、高温功率稳定等特性,是目前温度特性最好的激光器<sup>[1,2]</sup>。国内以前主要研究 InGaAsP/InP 材料系列激光器,对 AlGaInAs/InP 激光器的研究刚开始,目前我们正在进行 AlGaInAs 应变量子阱的金属有机化学气相外延(MOVPE)工艺技术研究 and 激光器的研制。为了获得良好的器件特性,在器件的核心部分采用 AlGaInAs(阱)/AlGaInAs(垒)应变多量子阱结构作为激光器的有源层,使依赖于载流子密度的阶带间吸收损耗减少<sup>[3]</sup>,从而提高量子效率,降低阈值电流密度,进一步提高激光器的温度特性。考虑到应变层超晶格生长存在临界厚度的问题,对设计量子阱个数受到一定的限制,但要得到好的器件性能,必须采用多量子阱结构设计,所以我们进行了应变补偿 AlGaInAs(压应变阱)/AlGaInAs(张应变垒)多量子阱结构设计,解决了量子阱数和应变层超晶格生长临界厚度的问题。通过反复实验,得到了 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器的 MOVPE 优化生长工艺条件,并进一步对量子阱结构和器件结构进行了优化。

## 2 材料生长和器件制作

材料生长用的设备是武汉邮电科学研究院国家光电子工艺中心(武汉分部)的 MOVPE 系统,是由德国 AIXTRON 公司生产的 AIX 200 型 LP-MOVPE 设备,具有 RUN/VENT 快速切换开关。反应用的 V 族源为 AsH<sub>3</sub>(砷烷),III 族源为 TMI<sub>n</sub>(三甲基铟),TMAl(三甲基铝)和 TMGa(三甲基镓),经钨管扩散纯化后的氢气为载气,材料的应变量主要通过 III、V 族源的流量的调节来控制。测试分析主要采用双晶 X 射线衍射(DCD)和光致发光(PL)以及二次离子质谱(SIMS)。

AlGaInAs 材料的生长难度非常大,最大困难就是 Al 的氧化。为了研究 MOVPE 工艺条件对 AlGaInAs 材料中氧杂质含量的影响,在不同的生长参数下生长了以下样品:

1)  $T = 700^\circ\text{C}$ ,  $V/III > 200$ , 在不同的反应腔压强  $P$  条件下生长 AlGaInAs 体材料:

AlGaInAs(100 mbar)/AlGaInAs(20 mbar)/InP(655°C, 20 mbar);

2)  $T = 700^\circ\text{C}$ ,  $V/III > 200$ ,  $P = 100$  mbar 条件下生长不同 Al 组份的 AlGaAs 体材料:

Al<sub>x1</sub>GaAs/GaAs/Al<sub>x2</sub>GaAs/GaAs( $x1 > x2$ );

3)  $T = 700^\circ\text{C}$ ,  $P = 100$  mbar 条件下生长不同 V/III 比的 AllnAs 体材料:

AllnAs( $V/III > 300$ )/AllnAs( $V/III > 200$ )/AllnAs( $V/III > 100$ )/InP。

在总结出优化的 AlGaInAs 材料生长工艺参数后,进行了 AlGaInAs 应变补偿量子阱结构材料的生长实验。生长的量子阱材料结构如图 1 所示。

$p^+$ -InGaAs	0.3 $\mu\text{m}$
$p$ -InP	1.8 $\mu\text{m}$
$p$ -AllnAs	50 nm
GRIN Al <sub>x</sub> Ga <sub>y</sub> In <sub>0.53</sub> As( $y = 0.155 \rightarrow 0$ )	0.1 $\mu\text{m}$
(AlGaInAs compressive strain 6 nm/AlGaInAs tensile strain 12~13 nm) $\times n$ MQW	
GRIN Al <sub>x</sub> Ga <sub>y</sub> In <sub>0.53</sub> As( $y = 0 \rightarrow 0.155$ )	0.1 $\mu\text{m}$
$n$ -AllnAs	90 nm
Al <sub>x</sub> Ga <sub>y</sub> In <sub>0.53</sub> As( $y = 0.155 \rightarrow 0$ )	10 nm
$n$ -InP	1.5 $\mu\text{m}$
Substrate $n$ -InP	

图 1 AlGaInAs 应变补偿量子阱结构示意图

Fig.1 Schematic structure of AlGaInAs strain-compensated quantum well

按照图示结构,分别生长了阱宽  $L_w = 6$  nm,垒宽  $L_b = 12 \sim 13$  nm,阱数  $n = 5, 6, 8, 10, 12$ ,阱采用压应变 AlGaInAs,应变量  $\epsilon_w = 1.1\%, 1.2\%, 1.3\%, 1.4\%, 1.6\%$ ,垒采用张应变的 AlGaInAs 的应变补偿量子阱结构材料。

在生长出高质量的 AlGaInAs/AlGaInAs 应变补偿量子阱材料后,进行了器件的制作。采用脊形波导结构制作激光器管芯,这样既可以避免湿法腐蚀时对有源层的损伤,也可以避免掩埋结构再生长时对有源层的热损伤,脊宽为  $2.5 \sim 3 \mu\text{m}$ ,器件的腔长为  $300 \sim 350 \mu\text{m}$ 。为了进一步提高器件的高温性能和器件芯片的成品率,对器件的欧姆接触层采用高掺锌 InGaAs 层,并采用溅射 TiPtAu 无合金欧姆接触技术,既提高了器件的工艺稳定性,又减小了器件的串联电阻。镀膜可降低阈值电流,提高发光效率,取腔面反射率  $R_f/R_r = 30\%/90\%$ 。

## 3 结果与讨论

表 1 为不同生长条件下 AlGaInAs 材料系的 SIMS 测试结果。从表 1 中可清楚地看到样品 1 中 AlGaInAs 的氧含量比 InP 的氧含量高两个数量级,

AlGaInAs 在反应腔的压强 100 mbar 下生长比在 20 mbar 下生长的氧含量低, 样品 2 的 SIMS 测试结果显示 AlGaAs 比 GaAs 的氧含量高近 1 个数量级, 并且 AlGaAs 中的氧含量随 Al 组份的增加而增加, 说明

Al 导致氧的引入, 样品 1 中的 AlGaInAs 和样品 3 中的 AlInAs 比样品 2 中的 AlGaAs 的氧含量高, 表明 In 的引入进一步增强了 Al 的氧化。

表 1 不同生长条件下 AlGaInAs 材料系的 SIMS 测试结果

Table 1 SIMS results of the AlGaInAs materials series by different MOVPE process parameters

Sample	Material	Growth parameters	Oxygen concentration by SIMS/cm <sup>3</sup>
1	AlGaInAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 100$ mbar	$3.0 \times 10^5$
1	AlGaInAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 20$ mbar	$9.0 \times 10^5$
1	InP	$T = 650^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 20$ mbar	$5.0 \times 10^3$
2	Al <sub>x</sub> 1GaAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 100$ mbar	$1.0 \times 10^5$
2	GaAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 100$ mbar	$8.0 \times 10^3$
2	Al <sub>x</sub> 2GaAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 100$ mbar	$7.0 \times 10^4$
3	AlInAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 300$ , $P = 100$ mbar	$3.0 \times 10^5$
3	AlInAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 200$ , $P = 100$ mbar	$5.0 \times 10^5$
3	AlInAs	$T = 700^\circ\text{C}$ , $V/III > 100$ , $P = 100$ mbar	$9.0 \times 10^5$

关于 In 元素对 AlGaInAs 材料中氧含量的影响, 国际上也有报道, 由此可以看出, AlGaInAs 的氧含量是由 In 源和 Al 源共同引起的, 样品 3 的 SIMS 测试结果显示 AlInAs 材料中的氧杂质含量随 V/III 比的增大而减少。通过 MOVPE 生长工艺参数的研究和对 AlGaInAs 材料中氧含量的测试分析, 得到了 AlGaInAs 材料 MOVPE 生长的优化参数: 生长温度  $700^\circ\text{C}$ ,  $V/III > 300$ , 反应腔压强为 100 mbar, 而且要考虑 III 和 V 族源的纯度、氢气纯度和系统气密性。我们换用更高纯度的 TMAI 源, 将固态 TMIn 源换成液态 TMIn 源。在钽纯化器后加吸附式纯化器, 将 H<sub>2</sub> 中的水气含量从  $10^{-6}$  降至  $10^{-9}$ , 同时增设露点仪和微氧分析器实行实时检测。在优化的工艺参数和设备条件下生长的 AlGaInAs 材料经 SIMS 测试得到材料中的氧含量约为  $9.0 \times 10^3$ , 降低了约两个数量级。

在降低 AlGaInAs 材料中氧含量的基础上, 进行了 AlGaInAs 应变补偿量子阱结构的生长研究。通过光荧光测试, 测量量子阱的发光波长, 研究器件结构和生长参数对其光学性能的影响; 通过 X 射线双晶衍射测试, 调整量子阱的应变、补偿度、量子阱周期, 使材料结构达到设计要求。图 2 中曲线 (a) 和 (b) 分别为 MOVPE 工艺优化前后 8 周期, 阱宽 6 nm, 垒宽 13 nm, 阱的应变量为 1.4% 的 AlGaInAs 应变补偿量子阱的室温光荧光光谱。从图中可以看到, 工艺优化后, 光荧光强度明显增强, 半宽从 48 meV 降低到了 26 meV, 这是因为氧是一种深能级

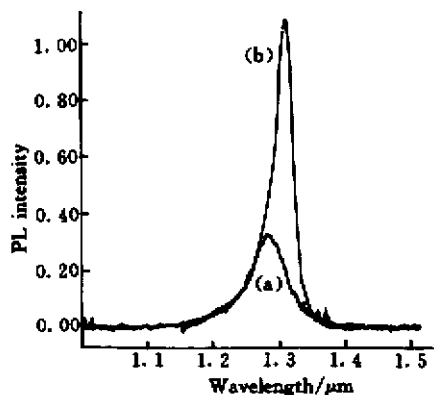


图 2 工艺优化前后生长的 AlGaInAs 应变量子阱材料的室温光荧光光谱

Fig. 2 PL spectrum of AlGaInAs strain-compensated quantum well: a. Grown by non-optimized process

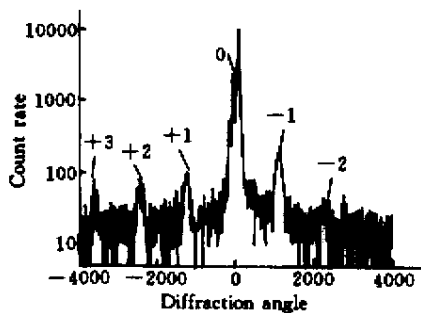


图 3 AlGaInAs 应变补偿量子阱 X 射线双晶衍射回摆曲线

Fig. 3 X-ray DCD rocking curve of AlGaInAs

施主杂质中心, 使材料呈高阻特征, 导致材料发光效

率下降,光荧光半宽增大。图 3 显示的是优化工艺后生长的 AlGaInAs 应变补偿量子阱结构 ( $n = 8, \epsilon_w = 1.4\%, L_w = 6 \text{ nm}, L_b = 13 \text{ nm}$ ) 的 X 射线双晶回摆曲线  $\theta$  级峰与衬底峰基本重合,实现应变补偿。6 级卫星峰强而尖锐,底部平整,说明界面平整性达到单原子层的水平。

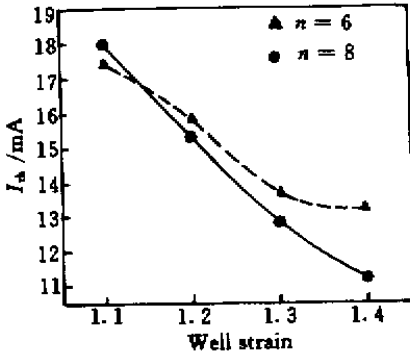


图 4 阈值电流和阱应变、阱数的关系

Fig.5 Threshold current versus well strain and well number

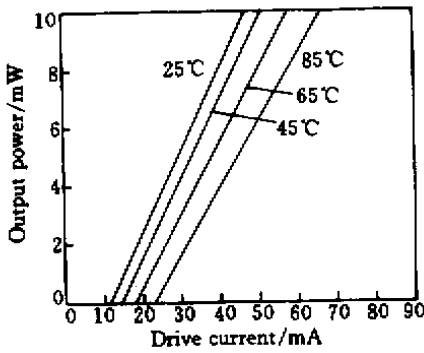


图 5 1.3 μm 无致冷 AlGaInAs 应变补偿量子阱激光器管芯的 P-I 曲线

Fig.5 P-I curve of 1.3 μm uncooled AlGaInAs strain-compensated quantum well laser chips

在成功生长出高质量的 AlGaInAs 应变补偿量子阱材料后,制作了 1.3 μm 无致冷激光器管芯,图 4 所示为激光器管芯阈值电流和阱应变、阱数的

关系曲线。从图 4 可以看出,当阱数  $n = 8$ ,阱的应变变量  $\epsilon_w = 1.4\%$  时,管芯阈值电流最小。由此,我们确定的最佳器件结构为:量子阱周期数为 8,阱宽为 6 nm,应变量为 1.4% 压应变,垒宽为 13 nm,应变量为  $-0.64\%$  张应变。图 5 为无致冷管芯的典型 P-I 曲线,25°C/45°C/65°C/85°C 时的阈值电流分别为 11.4/14.3/17.8/22.9 mA,发光效率变化  $\Delta\eta = -10\lg(0.23/0.28) = 0.85 \text{ dB}$ ,线性功率大于 10 mW,满足无致冷工作条件。

### 4 结 论

优化的 MOVPE 工艺能够有效降低 AlGaInAs 材料中的氧杂质含量,并且通过合理的应变补偿量子阱结构的设计和优化,可以生长出高质量的 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱材料,我们用此材料成功制作了 1.3 μm 无致冷激光器管芯,其关键指标是发光效率变化  $\Delta\eta_{ex}(25^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}) \leq 1.0 \text{ dB}$ 。我们制作的激光器管芯的(25°C ~ 85°C)发光效率变化在 0.85 dB 左右,接近目前国际上  $0.5 \text{ dB}^{[4]}$  的研究水平。

### 参 考 文 献

- 1 R. Bhat, C. E. Zah, M. A. Koza *et al.*. High-performance 1.3 μm AlGaInAs/InP strained quantum well lasers grown by organometallic chemical vapor deposition [ J ]. *Journal of Crystal Growth*, 1994, **145**: 858 ~ 865
- 2 J. Minch, S. H. Park, T. Keating *et al.*. Theory and experiment of  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  and  $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$  long-wavelength strained quantum-well lasers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**( 5 ): 771 ~ 782
- 3 Wayne W. Lui, Takayuki Yamanaka, Yuzo Yoshikuni *et al.*. Suppression of auger recombination effects in compressively strained quantum-well lasers [ J ]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**( 6 ): 1544 ~ 1552
- 4 Norio Yamamoto, Shunji Seki, Yoshio Noguchi *et al.*. Design criteria of 1.3 μm multiple-quantum-well lasers for high temperature operation [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**( 2 ): 137 ~ 139