

# 低压 MOCVD 外延生长 InGaAsP/InP 应变量子阱材料与器件应用 \*

马晓宇 王树堂 熊飞克 郭 良 王仲明 曾 靖 王丽明 陈良惠

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

**摘要** 本文报道用低压有机金属化合物化学气相沉积(LP-MOCVD)外延生长 InGaAsP/InP 应变量子阱材料,材料参数与外延条件的关系,量子阱器件的结构设计及其器件应用.用所生长的材料研制出宽接触阈值电流密度小于  $400\text{A}/\text{cm}^2$ (腔长  $400\mu\text{m}$ ), DC-PBH 结构阈值  $7\sim 12\text{mA}$  的  $1.3\mu\text{m}$  量子阱激光器和宽接触阈值电流密度小于  $600\text{A}/\text{cm}^2$ (腔长  $400\mu\text{m}$ ), DC-PBH 结构阈值  $9\sim 15\text{mA}$  的  $1.55\mu\text{m}$  量子阱激光器以及高功率  $1.3\mu\text{m}$  量子阱发光二极管和 InGaAs PIN 光电探测器.

**EEACC:** 0510D, 4250, 2530B, 4320J

## 1 引言

在今天的信息化社会里,光电子是最重要的、也是正在迅速崛起的产业之一.由于光纤通信的发展和应用,InGaAsP/InP 系光电子材料变得越来越重要了.为了外延 InGaAsP/InP 光电子材料,方法和手段的采用主要取决于外延的质量和外延结构生长的能力.液相外延(LPE)技术生长的体材料质量虽然很好,但界面较差,厚度很难控制,起伏很大,也很难进行大面积生长,更难于生长超薄层量子阱结构.在气相外延(VPE),分子束外延(MBE),化学束外延(CBE)和有机金属化合物化学气相沉积(MOCVD)技术中,MOCVD 技术具有高生长速率、高纯度、高质量、高产量、普适性、低成本、超薄层外延均匀性及重复性好等优点.特别是在近几年来,由于在量子阱结构中引入应变<sup>[1]</sup>和 MOCVD 生长技术的不断完善,在材料和结构性能上不断提高,使得 MOCVD 技术生长应变量子阱结构材料已成为一种主流.

## 2 MOCVD 设备和基本生长结果

我们所采用的 LP-MOCVD 生长技术,是在 AIX200 RD 系统上进行的.有机源为三甲基铟 TMIn 和三甲基镓 TMGa, V 族源为 100% 磷烷 PH<sub>3</sub> 和 100% 砷烷 AsH<sub>3</sub>, p 型和 n 型掺杂剂分别为二乙基锌 DEZn 和 2% 的硅烷 SiH<sub>4</sub>,载气为经过钯管纯化过的氢气.生长时生长室压力为 2000Pa, 生长温度为 655°C, V - III 比为 80-320, 生长速率约为  $1\sim 3\mu\text{m}/\text{h}$ .表

\* 国家“863”重大项目

马晓宇 男,1963 年生,副研究员,目前主要从事 MOCVD 外延生长,液相外延生长,实用化  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  半导体量子阱激光器及发光管的研制与开发

1995 年 9 月 18 日收到初稿,1996 年 1 月 5 日收到修改稿

1给出由LP-MOCVD生长的不故意掺杂InP和InGaAs的本底载流子浓度和载流子迁移率。

**表1 LP-MOCVD技术生长不故意掺杂InP及InGaAs材料的本底浓度和载流子迁移率**

	$n_{300K}/\text{cm}^{-3}$	$\mu_{300K}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	$\mu_{77K}/(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
InP	$1.1 \times 10^{15}$	4200	55560
InGaAs	$6 \times 10^{14}$	11100	72000

我们研究了在InP衬底上不同组分(波长)InGaAsP的晶格匹配生长条件,采用X光和光致发光(PL)分别测量样品的晶格失配和带隙波长。图1为生长与InP晶格匹配的InGaAsP四元材料所需的砷烷流量 $F(\text{AsH}_3)$ 及流经三甲基铟的 $H_2$ 气流量 $F(\text{TMIn})$ 与外延层带隙波长 $\lambda_e$ 之间的实验关系。实验中磷烷流量和流经三甲基镓的 $H_2$ 气流量分别固定为190ml/min及2.5ml/min。从中可以看出,当InGaAsP的波长靠近InP时,AsH<sub>3</sub>的流量非常小,需要很好的控制,TMIn的流量很大;而InGaAsP的波长变长时,AsH<sub>3</sub>的流量增大,TMIn的流量变小。为了器件的应用,必需对所有的生长参数,如生长温度,反应室压力,V/III比,生长速度,异质结界面的开关过程等进行优化。

实验中,655℃生长InGaAsP材料时,用2%的SiH<sub>4</sub>作为n型掺杂剂时,掺杂范围在( $2.5 \times 10^{15} \sim 1.4 \times 10^{19}$ ) $\text{cm}^{-3}$ 内可控;而用DEZn作为p型掺杂剂,掺杂范围为( $3 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{19}$ ) $\text{cm}^{-3}$ 。

为研究LP-MOCVD生长InGaAs(P)/InP量子阱结构的质量,我们在一个样品上同时生长了厚度分别为200nm的InGaAs参考层和标称厚度为10nm,5nm,2.5nm,1.25nm的InGaAs/InP多个单量子阱。此样品低温光致发光(PL)测量结果表明,即使是1.25nm厚的单量子阱的光致发光峰仍然很强,半宽为32meV,这是两个只差一个原子层厚的单量子阱叠加结果,这说明量子阱的界面起伏只有单原子层。

### 3 量子阱结构的设计与生长

量子阱激光器的结构设计主要从以下几个方面来考虑:

a 量子阱的个数选取:阱的数目少时,容易得到低阈值,但因为增益小,高温特性较差;而阱的数目多,增益大,高温特性好,但阈值较大,故综合考虑采用5个阱。

b 量子阱的应力选取:应力较大时,如1.5%的压应力,文献报道阈值电流密度最低<sup>[2]</sup>,但由于接近或超过临界厚度,寿命变得很差,无法实际应用。而应力较小时,阈值电流密度较大。从我们的实验结果,选用0.7%左右的压应力。

c 阵材料组分和厚度的选取:这主要由波长来决定的,并考虑厚度要小于临界值,一般

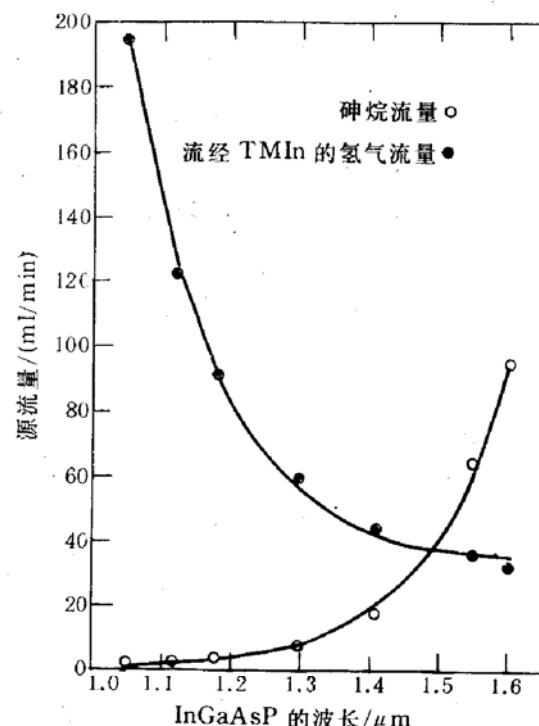


图1 生长与InP匹配的InGaAsP四元材料所需 $\text{AsH}_3$ 流量及流经TMIn的 $H_2$ 流量与外延层带隙波长之间关系

应变量子阱的厚度在 4~6nm 较好.

d 分别限制层的采用可提高载流子的注入效率,增加激光器的量子效率.

为此我们采用图 2 所示具有分别限制的应变量子阱结构. 对  $1.3\mu\text{m}$  量子阱激光器, 图 2a 所示结构的宽接触激射波长为  $1.3\mu\text{m}$ . 腔长  $400\mu\text{m}$  时, 阈值电流密度最低达  $400\text{A}/\text{cm}^2$ , 比无应变量子阱时的  $800\text{A}/\text{cm}^2$  降低约 50%; 量子效率也由无应变的 30% 提高到 36%.

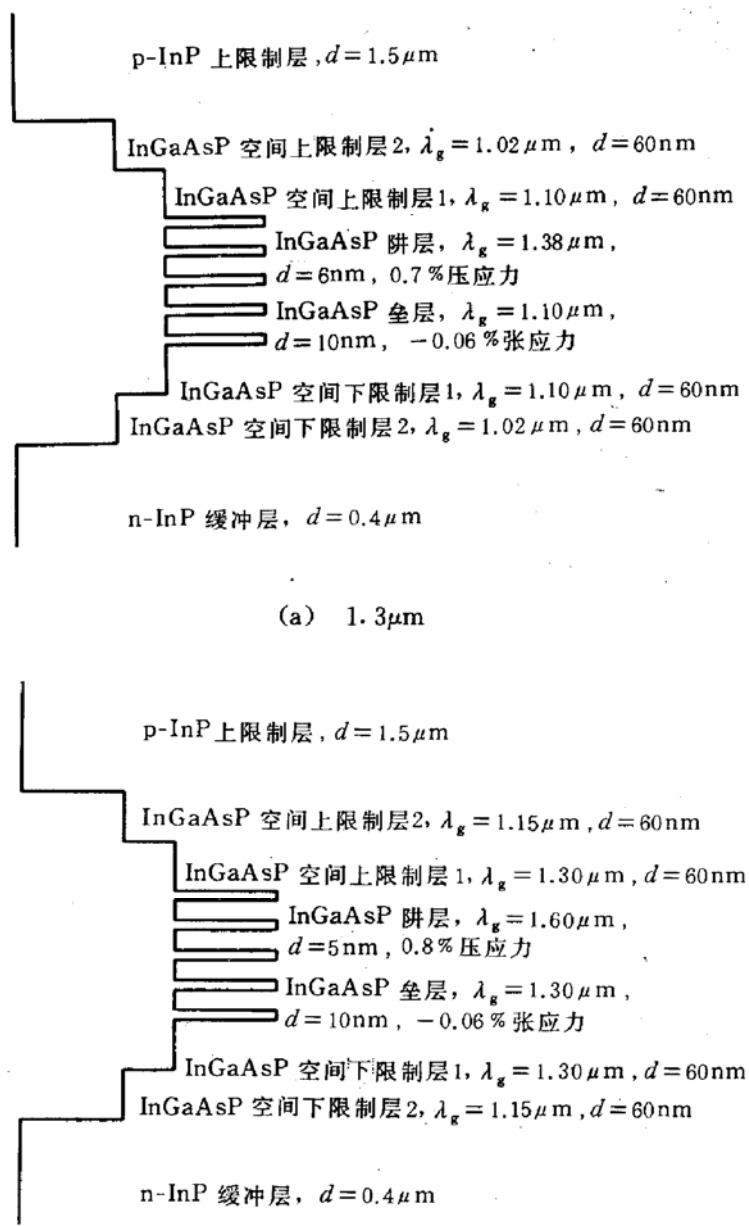


图 2 具有分别限制的 InGaAsP 应变量子阱结构示意图

表 2 给出了不同应变量子阱结构的宽接触阈值电流密度的实验值, 从中可以看出, 在我们采用的结构参数与工艺条件下, 压应变为 0.6%~0.7% 为最佳, 与设计的结果相一致. 当应力大于 0.77% 时, 已接近临界厚度, 器件的稳定性开始变差, 无法实际应用.

**表2 不同应力下的 $1.3\mu\text{m}$  QW结构宽接触阈值电流密度(腔长 $400\mu\text{m}$ )、量子效率及器件稳定性**

实验片号	IL-10	IL-11	IL-12	IL-13	IL-14	IL-15	IL-28	IL-31
应力 / %	-0.27	0	-0.55	0.22	0.77	0.5	0.7	0.98
宽接触阈值电流密度 / A/cm <sup>2</sup>	900	800	1200	800	400	600	400	600
量子效率 / %	28	30	30	30	36	34	36	38
器件稳定性	好	好	好	好	较差	好	好	很差

图2b所示结构的宽接触激射波长为 $1.55\mu\text{m}$ ,腔长 $400\mu\text{m}$ 时的宽接触阈值电流密度低达 $600\text{A}/\text{cm}^2$ ,比无应变时的 $1200\text{A}/\text{cm}^2$ 降低了一半;量子效率也由无应变时的20%提高到30%.应变的引入改变了价带的形状,使轻重空穴的简并态分开,态密度降低,俄歇复合和带间吸收损耗降低<sup>[3]</sup>,从而降低了阈值和提高了量子效率.

#### 4 器件应用

##### 4.1 应变量子阱激光器和发光二极管

我们采用前面设计生长的分别限制应变多量子阱结构,接着用液相外延技术二次生长DC-PBH条形结构。 $1.31\mu\text{m}$ 量子阱激光器的阈值为 $7\sim 12\text{mA}$ ,量子效率大于40%,图3a为典型的 $1.3\mu\text{m}$ 应变量子阱激光器的光功率-电流变温曲线,在 $100^\circ\text{C}$ 下仍可输出 $5\text{mW}$ ,最高激射温度为 $110^\circ\text{C}$ ,据我们所知,这是目前国内报道的最好水平.

$1.55\mu\text{m}$ 激光器的阈值为 $9\sim 15\text{mA}$ ,量子效率大于35%,图3b为典型的 $1.55\mu\text{m}$ 应变量子阱激光器的光功率-电流变温曲线,在 $85^\circ\text{C}$ 下仍可输出 $5\text{mW}$ ,最高激射温度为 $105^\circ\text{C}$ .

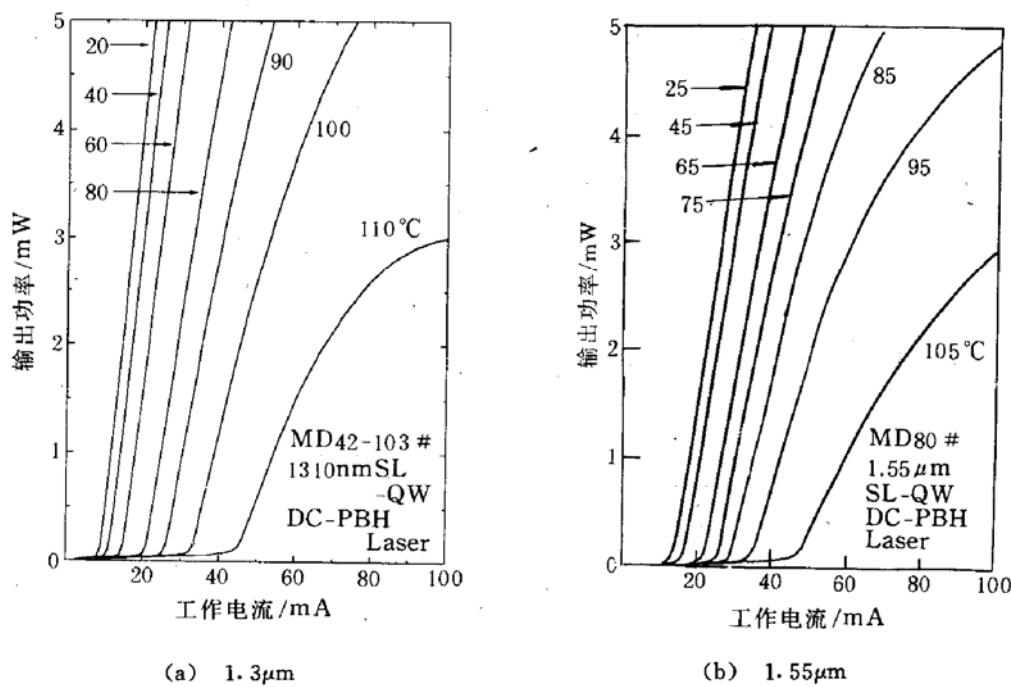


图3 应变量子阱激光器的功率-电流变温特性曲线

用MOCVD生长的多量子阱结构制备的 $1.3\mu\text{m}$ 量子阱发光二极管(QW LED)发散角小于 $45^\circ \times 45^\circ$ ,输出功率大于 $300\mu\text{W}$ ,单模光纤耦合输出 $40\mu\text{W}$ 以上.

##### 4.2 PIN光电探测器

采用液相外延制作的InGaAs/InP PIN光电探测器,由于As在In中的高溶解度,很难在InGaAs上生长高质量的InP顶层,而InGaAs三元材料的表面复合速度很大,直接暴露

在外的结果是，暗电流增大，量子效率降低。我们采用 MOCVD 生长的 InGaAs/InP PIN 结构片，本底浓度低，又带有 InP 钝化层，用其制作的 PIN 光电探测器，在-5V 的偏压下，暗电流小于 0.2nA，量子效率大于 0.96A/W。

## 5 结语

MOCVD 技术可满足 InGaAsP/InP 系光电子材料和器件的需要，与其它技术相比，均匀性和重复性好，可大面积生长，界面可控制在单原子层以内，在长波长光电子技术方面将发挥重要作用。

**致谢** 作者感谢参加工艺研究的杨亚丽、张洪琴、孙国喜、夏彩虹、朱天、白金花、郭胜军、周洲、张玉芳、归强等同志的大力支持，感谢徐俊英、潘贵生、朱文珍、童其美、张晓燕、何广平、么淑琴等同志在测试上的支持。作者还感谢国家光电子工艺中心毕可奎、王玉田、金才政、李秉臣等同志在端面镀膜、X 光测试、激光器测试、溅射等工艺及测试方面的大力支持。

## 参 考 文 献

- [1] P. J. A. Thijs, T. van Dongen, L. F. Tiemeijer *et al.*, *J. of Lightwave Technology*, 1994, **12**(1):28~36.
- [2] P. J. A. Thijs, L. F. Tiemeijer, P. I. Kuindersma *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron*, 1994, **27**:1426~1439.
- [3] A. R. Adams, *Electron. Lett.*, 1986, **22**:249.

## InGaAsP/InP Strained Layer Quantum Well Materials Grown by LP-MOCVD and Their Device Applications

Ma Xiaoyu, Wang Shutang, Xiong Feike, Guo Liang, Wang Zhongming,  
Zheng Jing, Wang Liming and Chen Lianghui

(*The Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 18 September 1995, revised manuscript received 5 January 1996

**Abstract** InGaAsP/InP strained layer quantum well (SL-QW) materials grown by low pressure metal organic chemical vapour deposition (LP-MOCVD) are reported. The relationship between the material parameters and the epitaxial conditions, the structural design of quantum well device and its applications are given in this paper. 1.3μm SL-QW laser and 1.55μm SL-QW lasers with broad area threshold current densities as low as 400A/cm<sup>2</sup> and 600A/cm<sup>2</sup> (at cavity length 400μm), DC-PBH stripe device threshold current 7~12mA and 9~15mA were obtained, respectively. High power 1.3μm QW light emitting diodes (LED), and InGaAs PIN photodetectors with high performance were also obtained by LP-MOCVD epitaxial materials.

EEACC: 0510D, 4250, 2530B, 4320J