

# 用 GSMBE 法生长匹配型 GaInAsP/InP 材料及量子阱、面发射激光器结构的研究\*

林世鸣

(中国科学院半导体研究所 集成光电子国家重点实验室 北京 100083)

**摘要** 本文报道通过在位组分调整,配合 X 射线双晶衍射测试和光致发光测试,生长了与 InP 精确匹配的 GaInAsP(失配度达  $4 \times 10^{-4}$ ),生长了 GaInAs/InP 量子阱结构的光致发光半峰宽达 5.72meV. 实验表明源炉挡板开启后生长速率是不均匀的,这对生长量子阱和 DBR 结构是个值得注意的问题,经考虑生长速率变化后生长的面发射激光器结构样片的反射率谱与理论计算的结果很好地相符.

**PACC:** 6855, 7865, 8115G, 4255P

## 1 引言

虽然 MBE 方法在生长量子阱光电子器件方面有很大的优越性,但它主要用于 GaAs 材料,而很难用于 InP 系的生长,其原因是磷的蒸汽压太高的缘故. 鉴于 InP 系材料对长波长光电应用方面的重要性,人们不满足于仅仅采用液相外延和 MOCVD 方法制作 InP 系长波长光电子器件,为此我们进行了用 GSMBE 方法生长匹配型 GaInAsP/InP 材料,并对所生长的量子阱与面发射激光器结构模拟片进行了研究.

GSMBE 技术的特点是继续采用固态 IV 族元素和杂质源,改用砷烷和磷烷作为 V 族元素源,从而解决了用 MBE 方法生长 InP 系材料的主要困难. 此外,由于采用了气态 V 族源,大大延长了为装源而将生长室暴露大气的周期,因而是一种很有前途的生长技术<sup>[1-3]</sup>.

在匹配型光电子器件中,失配度对器件的性能有决定性的影响,因此我们首先进行精确匹配 GaInAsP/InP 材料生长的研究. 同时通过对量子阱结构生长的研究,可以得到所必须的激射波长,以及提高量子阱材料的光学性能. 另外,为了调整面发射激光器中的 DBR 结构的高反射带位置和 F-P 谐振腔模式位置,生长速率的控制是极为重要的,为此我们对生长速率进行了较多的研究. 最后,在上述研究基础上进行了面发射激光器结构模拟片的生长,并解决了波长匹配的问题,从而达倒了理论预计的结果.

\* 国家自然科学基金资助项目

林世鸣 男,1945 年生,博士,副研究员,现从事半导体光电器件与集成研究  
1993 年 10 月 7 日收到初稿,1993 年 12 月 15 日收到修改稿

## 2 晶格匹配的 GaInAsP/InP 材料的生长

根据费伽定律,与 InP 晶格匹配的  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  材料的组分间有  $y \cong 2.2x$  的关系<sup>[4]</sup>. 可见,晶格匹配对四元系组分附加了条件,在这种情况下,能隙能量可以简单地表示为  $y$  的函数,实验中采用了如下的计算公式<sup>[5]</sup>:

$$\text{在 } 10\text{K 下,} \quad E_g = 1.425 - 0.7668y + 0.149y^2 \quad (1)$$

因此,可以用光致发光的方法测得  $E_g$  后,求得相应的  $y$  值. 当然,在实际实验中,当 GaInAsP 与 InP 不很匹配时,不能期望  $y$  与  $x$  有简单的关系,这时必须结合其它测试方法(如 X 射线双晶衍射测试)来确定组分比  $x$  和  $y$ .

在实际生长  $\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.7}\text{As}_{0.66}\text{P}_{0.34}$  外延层材料时,我们首先用 RHEED 法分别测得 In 和 Ga 的生长速率,由二者的比来确定  $x$  值. 而  $y$  值则初步由砷烷和磷烷的流量的比值来确定. 所得样片进行了低温光致发光和 X 射线双晶衍射测试,测试结果如图 1 所示,其失配度为  $-600$  弧秒. 基于这两个测试结果,求得  $x=0.296$ ,  $y=0.78$ . 可见用在位 REED 法测定 III 族源生长速率比来定  $x$  值的方法是比较精确的,而直接用砷烷、磷烷的流量比来定  $y$  值则有较大的偏差.

$y$  值的偏差的原因归结于磷烷与砷烷的粘滞系数的不同,在我们的生长条件下(衬底温度  $450^\circ\text{C}$ , 磷烷、砷烷流量约为  $1-4\text{sccm}$ ),可先估算粘滞系数比值  $\alpha$ ,再换算正确的  $y$  值, $\alpha$  由下式定义:

$$\frac{\alpha I_{\text{PH}_3}}{I_{\text{AsH}_3}} = \frac{1-y}{y} \quad (2)$$

由前述实验结果可算得  $\alpha$  值,然后为了使  $y=0.66$ ,可在保持  $\text{PH}_3$  流量条件下,重新计算并调整  $\text{AsH}_3$  的流量,从而生长得倒与 InP 完全晶格匹配的 GaInAsP 单晶层,如图 2 所示,其晶格失配度为  $4 \times 10^{-4}$ . 这个数值完全达到了器件对材料质量的要求.

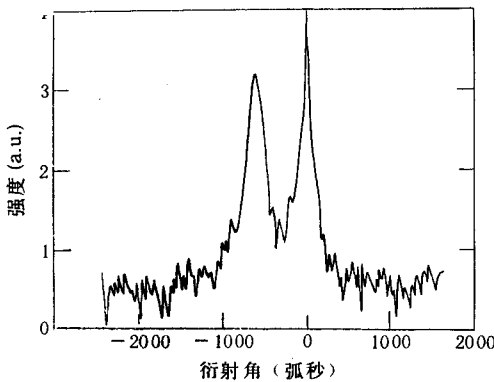


图 1 调整前 GaInAsP/InP X 射线双晶衍射测试的结果

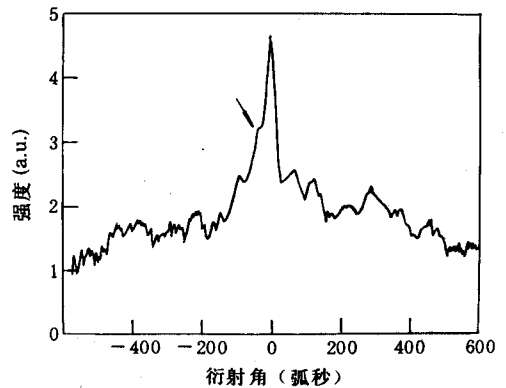


图 2 调整后 GaInAsP/InP X 射线双晶衍射测试的结果

### 3 用 GSMBE 法生长量子阱结构和生长速率的研究

为了研究 GSMBE 法生长的量子阱质量和特点,我们生长了以 InP 为垒,以与 InP 晶格匹配的  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  为阱的 5 个不同阱宽的量子阱结构,其阱宽分别为 200 Å、100 Å、50 Å、30 Å、10 Å,垒宽为 200 Å. 另外生长了 2000 Å 的  $Ga_{0.47}In_{0.53}As$  的体材料,对于 GaInAs 材料,可以有效地利用 REED 方法进行组分调整,并可利用光致发光法来检测其组分的精确性.

对所生长的样片进行了光致发光测试,其结果如图 3 所示. 其中 6 个光致发光峰的测试参数总结在表 1 中. 在 5 个量子阱光致发光中,除第 1 峰外各峰的半峰宽小于 10meV(最小的是 5.72meV),可见各量子阱材料生长质量是不错的. 在阱层与垒层交替生长时,考虑到 InP 和 GaInAs 使用不同的 V 族气态源,为了避免相互干扰,影响界面的突变性,因此中间采用 10 秒中断生长, V 族气态源各保持 5 秒的转换方式,从测试结果看,界面的质量还是不错的. 但从 10 Å 量子阱光致发光峰的测量结果来看,其峰值位置偏差以及半峰宽较大,说明在生长近原子层的极薄量子阱时,厚度的偏差和界面质量的影响相对较大.

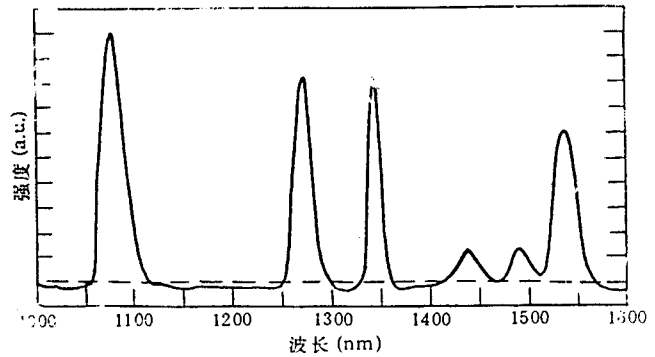


图 3 量子阱生长样片光致发光测试结果

在表中给出的从理论上求得的不同阱宽的量子阱光致发光波长值,它是按下式计算的<sup>[6]</sup>:

$$E(w) = E_g(GaInAs) + E_{1e}(w) + E_{1hh}(w) - E_b(w) \tag{3}$$

式中  $E_g$  为  $Ga_{0.57}In_{0.43}As$  材料能隙能量,  $E_{1e}(w)$  和  $E_{1hh}(w)$  是量子阱中电子和空穴第一能级的能量,  $E_b$  是自由激子的束缚能.

表 1 量子阱生长样片光致发光测试结果及与理论值的比较

峰 序	1	2	3	4	5	6
阱宽 $W(\text{Å})$	10	30	50	100	200	2000
半峰宽 (meV)	18.73	7.89	5.72	9.56	9.35	11.35
峰波长 $\lambda(\text{nm})$	1089.89	1270.60	1344.00	1434.13	1488.44	1537.68
理论波长 $\lambda_0(\text{nm})$	1020.40	1239.63	1347.05	1455.26	1510.41	1536.17
偏差 $\lambda - \lambda_0(\text{nm})$	+69.99	+30.97	-3.05	-21.13	-21.97	+1.51
比生长率 $\gamma$	1.5	1.1	0.97	0.87	0.72	

另外由 2000 Å 体材料 GaInAs 的光致发光测试结果看,实验值与理论值偏差 < 0.1%,说明实际生长的 InGaAs 阱的组分与能隙值都相当准确,因而各量子阱光致发光峰实验值与理论值的偏差应反映阱宽的偏差.由表中的比较值可见,比 50 Å 窄的阱的峰波长偏长波方向,表示其阱宽比预料的宽,比 50 Å 宽的阱的峰波长偏短波方向,表示其阱宽比预料的窄,可见,用 RHEED 方法测得的生长速率对于生长 ~50 Å 的量子阱,计算是较准确的,对于其它阱宽则要加以修正.当层厚超过 300 Å 后,量子效应消失,光致发光峰波长与层厚无关,因此只能由上述变化延伸估计.生长 DBR 结构时,对生长层厚度的精度要求十分严格,有必要对生长速率的变化作精确调整.

### 4 长波长面发射激光器结构模拟片的生长研究

为了生长面发射激光器,首先应研究如何使 F-P 腔的谐振波长与量子阱的激射波长相匹配,为此,我们试生长了面发射激光器结构的模拟片,并进行了反射率谱的测量,同时将其与计算结果相比较,以便对生长条件进行精确的调整.长波长面发射激光器结构模拟片的结构如图 4 所示,它的顶层和底层分别是 P 型和 N 型掺杂的分布布拉格反射器(DBR),中间夹着 i 型的 3 个量子阱的有源区. DBR 是 5 个周期的由 Ga<sub>0.3</sub>In<sub>0.7</sub>As<sub>0.66</sub>P<sub>0.34</sub>/InP(1057 Å/1141 Å)相间组成的高反射膜,虽然 5 个周期只能达到 85% 的反射率,离 98% 的反射率还差得很远,但已足以研究波长匹配问题,以便决定生长器件时所需的工艺条件.

为了计算上述结构的反射率谱,需用数值计算的方法<sup>[7]</sup>,其计算结果示于图 5 中,为了使结构设计更为精确,其中折射率由如下公式求得<sup>[8]</sup>:

$$n^2 = 1 + \frac{A_1}{1 - (\frac{E}{E_p + E_1})^2} + \frac{A_2}{1 - (\frac{E}{E_p + E_2})^2} \tag{4}$$

式中,  $A_1 = 13.3510 - 5.4554E_p + 1.2332E_p^2$ ,  $A_2 = 0.7140 - 0.3660E_p$ ,  $E_1 = 2.5048\text{eV}$ ,  $E_2 = 0.1638\text{eV}$ ,  $E_p$  为材料的能隙宽度.

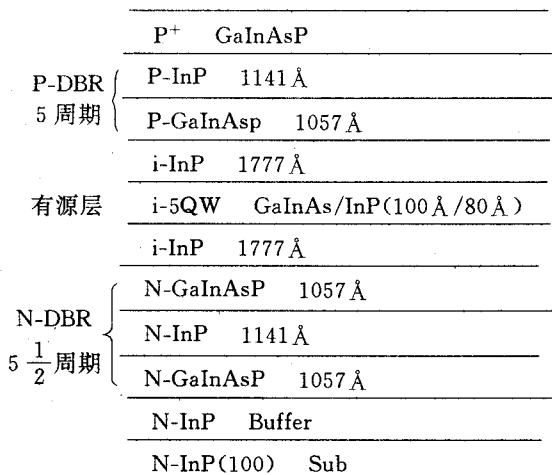


图 4 长波长面发射激光器模拟样片结构图

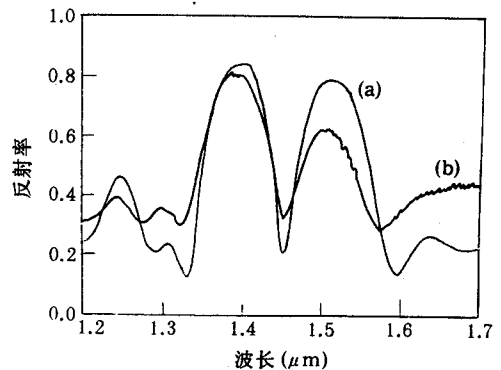


图 5 长波长面发射激光器模拟样片反射率谱  
(a)理论计算结果 (b)测试结果

对于实际生长的长波长面发射激光器结构的模拟片,基于前文所述对层厚度控制的考察,对于不同层厚将 RHEED 所测的生长速率进行分别修正,从而将 F-P 腔的模式调至所需的波长位置,调整后的生长样片的测试结果也示于图 5 中,可见它与计算结果符合得很好.

总之,如此生长的面发射激光器结构的模拟片为下一步生长和制作器件提供了基础.

## 5 结束语

我们用 GSMBE 法生长了 InP 精确匹配的 GaInAsP 材料(其失配度达  $4 \times 10^{-4}$ ),生长了 GaInAs/InP 量子阱结构,其光致发光半峰宽达 5.72meV,生长了长波长面发射激光器结构的模拟样片,其反射率谱与理论计算的结果很好地相符.

## 参 考 文 献

- [1] W. T. Tsang, J. Crystal Growth, 1991, **QE-28**:529.
- [2] H. Q. Hou and C. W. Tu, J. Crystal Growth, 1992, **120**:167.
- [3] T. P. Chin *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1991, **58**:254.
- [4] K. Nakajima *et al.*, J. Appl. Phys. Lett., 1978, **49**:5944.
- [5] K. Alavi, R. L. Aggarwal and S. H. Groves, Phys. Rev., 1980, **B, 21**:1311.
- [6] R. L. Greene and K. K. Bejaj, Solid Commun, 1983, **45**:831.
- [7] 林世鸣, 半导体学报, 1989, **11**:288.
- [8] C. H. Henry *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1985, **QE-12**:1887.

## Growth of Lattice-Matching GaInAsP/InP Material, Quantum Well and Surface-emitting Laser Structure by GSMBE

Lin Shiming

*(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences,*

*National Integrated Opto-Electronics Laboratory, Beijing 100083)*

Received 7 October 1993, revised manuscript received 15 December 1993

**Abstract** We have grown lattice-matching GaInAsP/InP material by GSMBE based on in-situ composition calibration and the measurements of X-ray diffraction and low-temperature photoluminescence (the lattice mismatch is less than  $4 \times 10^{-4}$ ). We have also grown GaInAs/InP quantum well and surface-emitting Laser structure. The linewidth in the photoluminescence spectra of quantum well is 5.72meV. The reflection spectra of the SEL structure obtained by measurements and theoretical calculations are almost the same.

**PACC:** 6855, 7865, 8115G, 4255P