

气态源分子束外延 InP 和 InAs 基 Ⅲ - V 族化合物材料*

袁瑞霞 阎春辉 国红熙 李晓兵
朱世荣 曾一平 李凌霄 孔梅影

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文简要报告我们气态源分子束外延实验结果. 材料是 GaAs(100)衬底上外延的晶格匹配的 $\text{In}_y(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{1-y}\text{P}$ ($x=0\sim 1, y=0.5$), InGaP/InAlP 多量子阱; 在 InP(100)衬底上外延的 InP, 晶格匹配的 InGaAs、InAlAs 以及 InP/InGaAs、InP/InAsP 多量子阱, InGaAs/InAlAs HEMT 等. 外延实验是用国产第一台化学束外延(CBE)系统做的.

EEACC: 0510D, 2520D, 2530B

1 引言^[1~4]

InP 和 InAs 基 Ⅲ - V 族化合物如 InP, InGaAlP, InGaAsP, InAlAs 等在光电子器件, 微波高速器件以及光电子集成等方面有着广泛的应用. 例如制作长波长(1.3 或 1.5 μm) 半导体激光器, 探测器以及与它们集成的 HEMT, HBT, 光波导等; 在 GaAs 衬底上外延的晶格匹配的 $\text{In}_y(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{1-y}\text{P}$ ($y=0.5, x=0.1$) 可做可见光(红光或更短波长)的激光器. 多种外延技术可以外延这些材料, 如液相外延(LPE)、金属有机物气相外延(MOVPE)、分子束外延(MBE)以及综合 MOVPE 和 MBE 技术的化学束外延(CBE)和气态源分子束外延(GSMBE). 在 GSMBE 中, V 族(砷和磷)分子束流是在生长室内加热分解由生长室外部导入的气态砷烷(AsH_3)和磷烷(PH_3)形成的. 导入的气体量和种类可以精确控制. GSMBE 还保留了常规分子束外延的清洁超高真空外延环境以及使用反射式高能电子衍射对外延过程进行在位的精确控制等优点. 在 GSMBE 中 Ⅲ 族分子束源(多数情况下还有 N 型和 P 型掺杂剂)像 MBE 一样使用高纯固态源, 与使用有机金属化合物源做为 Ⅲ 族分子束源的化学束外延(CBE)相比较, GSMBE 的外延过程简单易于控制, 而且可避免有机金属化合物源可能带来的杂质污染.

* “国家高技术”资助项目

袁瑞霞 男, 1942 年生, 高级工程师, 目前从事半导体超薄层微结构材料研究
1994 年 9 月 22 日收到初稿, 1995 年 1 月 23 日收到修改稿

我们与中国科学院沈阳科学仪器厂联合研制成功我国第一台化学束外延系统. 我们使用该系分别采用 MOMBE 技术(固态砷源、有机金属化合物 TMIn, TEGa, TMAI), CBE 技术(使用磷烷 PH_3 和有机金属化合物 TMIn)和 GSMBE 技术(使用气态 V 族分子束源 AsH_3 和 PH_3 及固态 III 族分子束源)已先后研制出一批优良的外延材料(包括多种多量子阱材料, 选择掺杂异质结构材料等). 这里简要报告其中我们采用 GSMBE 技术外延的材料结果.

2 GSMBE 实验

如引言所述, 本实验所用的外延设备是一台国产 CBE 系统, 生长室使用带液氮冷阱的油扩散泵抽气. 生长室背景真空为 $0.13\mu\text{Pa}$, 工作时生长室真空度取决于进入生长室的气体流量, 一般在 $13\sim 1.3\text{mPa}$ 范围, 高纯砷烷(AsH_3)和磷烷(PH_3)通过质量流量计和气动阀门进入生长室内的气态源炉, 并在那里受热分解成氢, 砷和磷的分子束流, 热分解温度一般保持在 950°C , 高纯镓(Ga), 铟(In)和铝(Al)则作为 III 族分子束源在通常 MBE 源炉内加热形成分子束. 半绝缘(100)GaAs 和 InP 抛光衬底片经过常规去油, 化学腐蚀, 用熔化的铟粘到钼托上, 通过进样室, 分析室送入生长室; 在外延过程中 V 族(砷和磷)分子束流切换时, 外延有短暂停顿. 在 AsH_3 和 PH_3 气体管路中设有排放管路(Vent), 使用 Run-Vent 切换以保证 AsH_3 和 PH_3 变换时, 气体流量稳定. 各材料的 III 族元素组分通过改变相应的分子束流强度进行调整. 而分子束流强度则由实测的束流等效压强或相应的二元化合物生长速率来表征, 后者是用反射式高能电子衍射强度振荡在位测量的. 各材料外延衬底温度不同, 大致在 $450\sim 520^\circ\text{C}$ 范围.

3 材料性能

3.1 InP、(InGa)As 和 (InGa)P^[1,4,5,6,7]

InP 和 (InGa)As 是在半绝缘 InP(100)衬底上外延的, (InGa)P 是在半绝缘 GaAs(100)衬底上外延的, 这些材料的最佳霍尔测量结果示于表 1.

表 1 InP、(InGa)As、(InGa)P 霍尔测量结果

材料	电子浓度/ cm^{-3}		电子迁移率/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$		外延层厚度/ μm
	300K	77K	300K	77K	
InP	8.4×10^{14}	3.5×10^{14}	3400	61000	6
InGaAs	4.6×10^{15}	4.1×10^{15}	8317	47744	1
InGaP	4.0×10^{15}	4.0×10^{15}	3400	30000	1.7

这些外延材料电学性能已达国际水平. (InGa)As 和 (InGa)P 与相应衬底的晶格失配多数在 1×10^3 左右, 较小者为 10^{-4} 数量级. 图 1 是 InP 外延膜的 10K 的光致发光谱. 其中 1.419eV 主峰和 1.379eV, 1.386eV 两个小峰分别推测为 (D^0X), (DA) 和 (A^0e).

3.2 与 GaAs 匹配的 $\text{In}_{0.5}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{0.5}\text{P}(x=0.1)^{[8]}$

所外延的 $\text{In}(\text{GaAl})\text{P}$ 材料表面光亮(x 从 0 到 1),外延层的 In 含量和该外延层与 GaAs 失配度是用 X 射线双晶衍射(XRD)测量,晶格失配度为 1×10^{-3} 左右.各种铝含量的 $(\text{In}(\text{GaAl})\text{P}$ 膜($x=0, 0.25, 0.5$ 和 1)均可以发出较强的荧光.它们的室温阴极荧光肉眼可见,颜色从红色、橙色到黄绿色. GaInP 和 AlInP 的 77K 光致发光(PL)峰分别在 644nm 和 513nm 它们的半峰宽(FWHM)为 19meV 和 24meV(图 2).

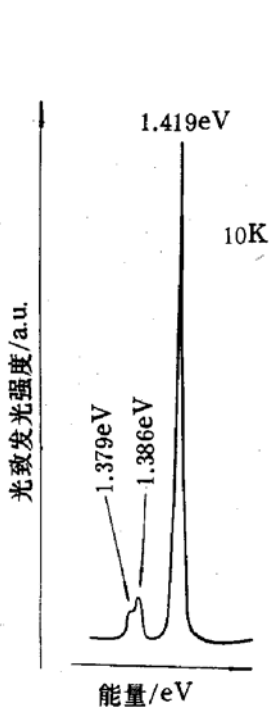


图 1 InP 外延膜 10K 光致发光谱

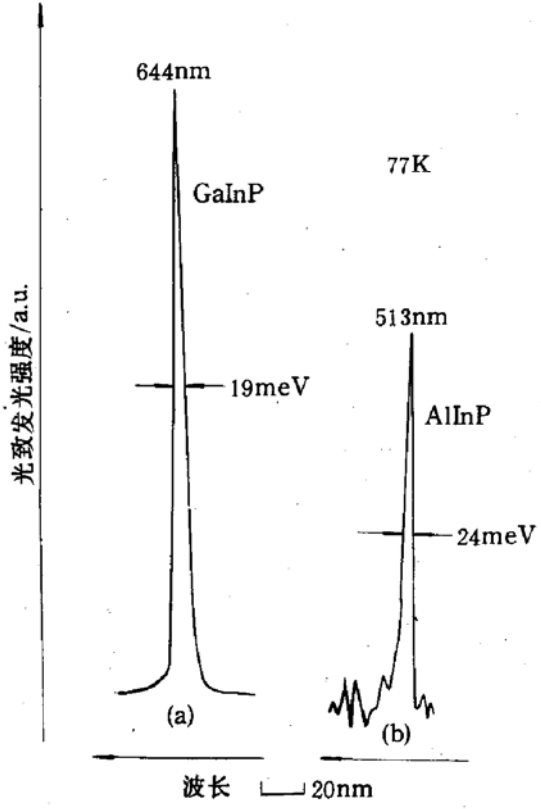


图 2 GaInP (a)和 AlInP (b)的 77K 光致发光谱

3.3 $\text{InGaP}/\text{InAlP}, \text{InP}/\text{InGaAs}, \text{InP}/\text{InAsP}$ 多量子阱材料(MQW)^[1,9]

这三种多量子阱材料均做了双晶 X 射线衍射分析(图 3).从图中明显可见多级卫星衍射峰,显示了这些材料的良好周期结构,表明外延过程中各层厚度,组分的准确重复控制.所分析的三种多量子阱材料的结构分别为:

$\text{Al}_{0.3}\text{In}_{0.5}\text{P}(100\text{ \AA})/\text{Ga}_{0.3}\text{In}_{0.5}(40\text{ \AA})$, 20 个周期; $\text{InP}(90\text{ \AA})/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}(40\text{ \AA})$, 40 个周期; $\text{InP}(57\text{ \AA})/\text{InAs}_{0.18}\text{P}_{0.82}(131\text{ \AA})$, 40 个周期;对 $\text{InAlP}/\text{InGaP}$ MQW 材料的阴极荧光测量表明它的荧光比 GaInP 强几倍,其室温和 80K 的阴极荧光波长分别是 647nm 和 622nm,相应的半峰宽(FWHM)分别为 65meV 和 40meV;其 10K 光致发光峰波长在 608nm,FWHM 为 15meV(表 2).

表 2 $(\text{GaIn})\text{P}/(\text{AlIn})\text{P}$ 多量子阱阴极荧光(CL)和光致发光(PL)发光波长及半峰宽(FWHM)

	CL(300K)	CL(80K)	PL(10K)
发光峰波长(nm)	647	622	608
发光峰半高宽(meV)	65	40	15

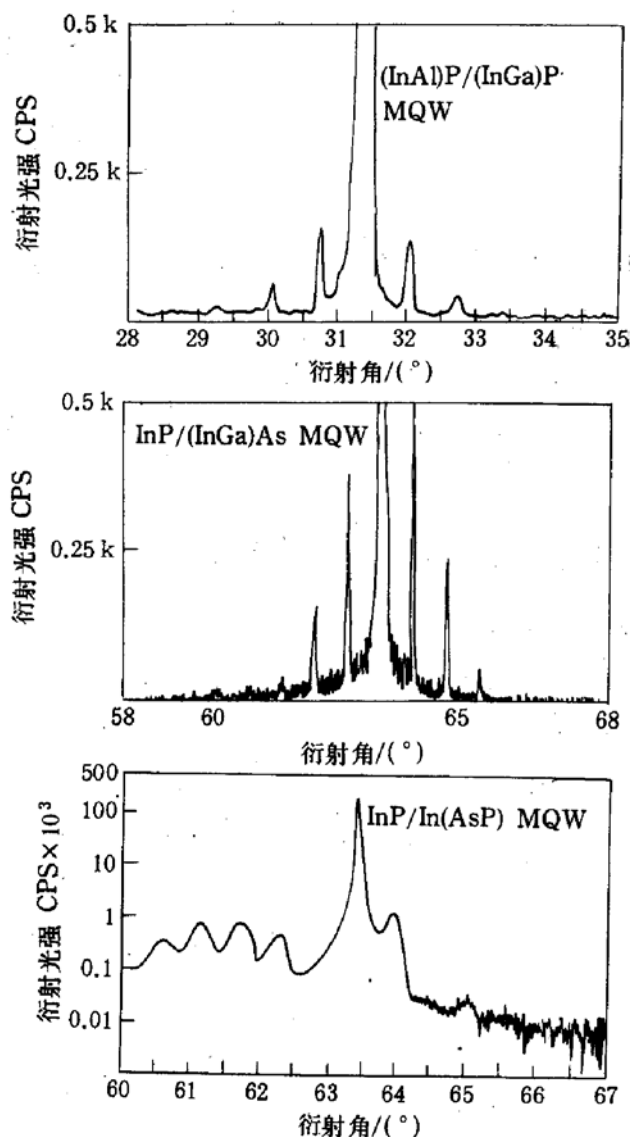


图3 三种多量子阱(MQW)材料的 X 射线双晶(004)衍射

3.4 InAlAs/InGaAs HEMT 材料^[10]

该材料结构如图 4 所示,它的霍尔测量结果示于表 3,值得注意的是该材料的二维电子气面密度和迁移率很高,有利于提高器件性能.

100 Å	n ⁺	InGaAs
200 Å	不掺杂	InAlAs
100 Å	n ⁺	InAlAs
100 Å	不掺杂	InAlAs
400 Å	不掺杂	InGaAs
3000 Å	不掺杂	InAlAs
1000 Å		缓冲 InP
半绝缘 InP(100)衬底		

图4 InAlAs/InGaAs HEMT 结构

表3 InAlAs/InGaAs HEMT Hall 测量结果

材料号	电子面密度/cm ⁻²		电子迁移率/(cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)	
	300K	77K	300K	77K
1#	2.5×10 ¹²	2×10 ¹²	8621	37290
2#	3.4×10 ¹²	2.8×10 ¹²	8584	33688

4 结论

我们用联合研制的国产第一台 CBE 系统,采用 GSMBE 技术,已研制出一系列性能优良的 InP 和 InAs 基 III-V 族化合物材料.

致谢 感谢以下同志在材料测试分析上所给予的

帮助:王万年,李成基,李韞然,王玉田,高维宾,王维明,蔚燕华,滕达,郑婉华,罗昌平.

参 考 文 献

- [1] M. B. Panish, J. Cryst. Growth, 1987, **81**:249;
- [2] W. T. Tsaneg, J. Cryst. Growth, 1987, **81**:261.
- [3] 孙殿照等,半导体情报,1991,**28**(6):46.
- [4] 袁瑞霞,阎春辉,国红熙等,半导体学报,1994,**15**(5):312
- [5] M. Lambert, A. Peralis, R. Vergnaud and C. Starck, J. Cryst. Growth, 1990, **105**:97.
- [6] H. Asonen, K. Rakenus, K. Tappura *et al.*, J. Cryst. Growth, 1990, **105**:101.
- [7] J. M. Kuo and E. A. Fitzgerald, J. Vac. Sci. Technol. 1992, **B10**:959.
- [8] M. J. Hafich, H. Y. Lee, T. E. Crumbaker *et al.*, J. Vac. Sci. Technol., 1991,**B10**:969.

- [9] H. Q. Hou, C. W. Tu and S. N. G. Chu, Appl. Phys. Lett., 1991, **58**:2954.
- [10] V. Hirose, K. Ohata, T. Mizutami *et al.*, Int. Symp. GaAs and Related Compounds, Karuizawa, Japan, 1985, 529~534.

InP and InAs Based III - V Compound Materials Grown by Gas-Source Molecular Beam Epitaxy

Yuan Ruixia, Yan Chunhui, Guo Hongxi, Li Xiaobing,
Zhu Shirong, Zeng Yiping, Li Lingxiao and Kong Meiyang

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

Received 22 September 1994, revised manuscript received 23 January 1995

Abstract We report on the growth and properties of the InAs and InP based III - V compounds grown in our laboratory by gas source molecular beam epitaxy technique (GSMBE) using the first China-made chemical beam epitaxy (CBE) system. These grown materials are the lattice-matched $\text{In}_y(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_{1-y}\text{P}$ ($x=0\sim 1, y\approx 0.50$), InGaP/InAlP multiple quantum wells (MQWs) on GaAs (100) substrates, the lattice-matched Inp, InGaAs, InGaAs/InAlAs high electron mobility transistor (HEMT) structures, InGaAs/InP MQWs and the strained-layer In(AsP)/InP MQWs on InP(100) substrates.

EEACC: 0510D, 2520D, 2530B