

InGaAs/InP 超晶格材料的 GSMBE 生长研究

孙殿照 王晓亮* 李晓兵 国红熙 阎春辉 李建平
朱世荣 李凌霄 曾一平 孔梅影 侯洵*

(中国科学院半导体所 北京 100083)

(*中国科学院西安光机所 西安 710068)

摘要 在国产第一台 CBE (Chemical beam epitaxy) 设备上, 用 GSMBE (Gas source molecular beam epitaxy) 技术在国内首次研究了 InGaAs/InP 匹配和应变多量子阱超晶格材料的生长, 用不对称切换方法成功地生长了高质量的匹配和正负应变超晶格材料, 并用双晶 X-射线衍射技术对样品进行了测试和分析. 结果表明, 我们在国产第一台 CBE 设备上用 GSMBE 技术采用非对称切换方法生长的超晶格材料质量很好.

PACC: 8115G, 6865

1 引言

实现高质量异质结外延的主要问题是晶格失配和热膨胀系数失配问题. 这两个失配将导致失配位错, 而失配位错的产生是材料达不到器件级水平的主要原因. 外延层必须和衬底匹配的要求严格地限制了异质结构的组份范围. 应变量子阱超晶格材料是一类新的具有周期性结构的人工改性材料, 它突破了要求晶格常数匹配的传统限制, 专门人为地引进失配以改善材料的光电性能. 这种材料的出现, 不但极大地拓宽了材料系统和异质结构组份的选择范围, 而且为应用能带工程设计能带结构、剪裁材料的光电特性增加了一个自由度, 为发展新型应变量子阱效应器件奠定了基础. 只要控制应变量子阱超晶格材料每层的厚度, 使其小于相应的临界厚度, 并使整个厚度小于超晶格的临界厚度, 则晶格失配会自动调节产生相干形变, 这种相干形变不会引入失配位错. 相干形变会产生内应力, 内应力会使能带结构发生变化: ①禁带宽度发生变化; ②价带轻重空穴带简并消除; ③轻重空穴带有效质量发生变

孙殿照 男, 1942年生, 高工(研究员), 从事半导体超薄微结构材料及器件生长及特性研究
王晓亮 男, 1963年生, 讲师, 博士研究生, 从事半导体微电子及光电子材料生长、物理及器件研究
1994年6月8日收到初稿, 1995年10月5日收到修改稿

化. 这种变化不仅可以用来调节激光器的输出波长, 而且极大地改善了激光器的性能¹⁻⁴.

人们对 InGaAs/GaAs 应变系统作了广范的研究, 以 GaAs 为基底的应变量子阱超晶格 InGaAs/GaAs 材料制成的 $0.98\mu\text{m}$ 泵浦掺铒光纤放大器的激光光源的单管输出功率已达到 180mW ^[5], 室温阈值电流密度低于 $58\text{A}/\text{cm}^2$ ^[6]. 与 InGaAs/GaAs 系统相比, InGaAs/InP 应变量子阱超晶格则研究的较少, 这主要是由于: ①生长 InGaAs/InP 超晶格材料涉及到 P_2/As_2 切换; ② As_2 较 P_2 具有更严重的记忆效应. 这两种因素均使 InGaAs 与 InP 的界面组分陡峭性变差, 使得 InGaAs/InP 应变量子阱超晶格更难生长. 我们在国产第一台 CBE 设备上, 用 GSMBE 技术在国内首次研究了 InGaAs/InP 匹配和伸张应变量子阱超晶格材料的生长, 用不对称切换技术生长出了优质的匹配及正负失配超晶格材料, 并用双晶 X-射线衍射技术对样品进行了测试和分析.

2 实验

1. 衬底: 用掺 Fe 半绝缘 InP 衬底, 晶向为 $[100]$. 首先用有机溶剂对衬底进行去蜡去油处理, 然后用溴甲醇溶液对衬底进行腐蚀, 18M 去离子水冲洗, 甩干水. 用 In 将衬底片粘到 Mo 托上, 送入分析室除气 30min , 除气温度约 200°C . 经除气的衬底在生长前转移到生长室, 在 P_2 保护下加热去除表面氧气层, 加热温度约 500°C 左右, 用反射高能电子衍射仪 (RHEED) 监测, 直到除去表面氧化层.

2. 生长: 固态 In 源和 Ga 源的纯度分别为 7N 和 8N , 气态源浓度为 100% 的高纯 AsH_3 和 Ph_3 . InP 垒层和 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 阱层的生长速率均约为 $1\text{mL}/\text{s}$, 生长温度为 500°C . 用两个 In 源炉, 一个 Ga 源炉, 生长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 阱层时用其中一个 In 源炉, 生长 InP 垒层时, 用两个 In 源炉, 这样做的好处是 In 组分 x 和 InP 垒层的生长速率可以独立地进行控制. 整个生长过程用计算机自动控制. 首先生长一层约 1000\AA 的 InP 缓冲层, 接着交替生长 InGaAs 阱层和 InP 垒层, 阱层设计宽度为 $40\sim 50\text{\AA}$, 垒层设计宽度为 $45\sim 140\text{\AA}$, 周期数为 40.

3. As_2/P_2 切换: 获得陡峭界面的关键是控制 As_2/P_2 切换, 考虑到 As_2 的粘附系数比 P_2 的粘附系数大, As_2 的记忆效应比 P_2 严重, 我们在生长过程中采用了不对称切换技术, 即: 从 As_2 向 P_2 切换时用 P_2 冲刷生长室中残余 As_2 的时间比从 P_2 向 As_2 切换时用 As_2 冲刷生长室中残余 P_2 的时间长.

3 结果和讨论

1. 双晶 X-射线衍射 (DCXR) 测量结果: 我们对三个样品 (样品 1、样品 2 和样品 3) 进行了 DCXR 测量, 其结果如图 1、图 2 和图 3 所示. 由图可见, 样品 1 是匹配超晶格, 可看到 7 个单边卫星峰; 样品 2 (图 2) 的零级峰位于衬底峰的左侧, 是负失配超晶格, 可看到 5 级单边卫星峰; 样品 3 (图 3) 的零级卫星峰位于衬底峰的左侧, 是正失配超晶格, 可看到单边 12 级卫星峰 (其中有三个峰未打印出来).

2. 计算超晶格周期: 应用公式 $L_{\text{sl}} = \lambda \cdot \Delta\theta / (2\cos\theta)$ 可以求出超晶格的平均周期 L_{sl} , 其中 λ 是 x -射线波长, θ 为相邻两个卫星峰 Bragg 角的平均值, $\Delta\theta$ 为相邻两个卫星峰之间的角距离. 据此公式求出样品 1 的周期为 149\AA , 样品 2 的周期为 94\AA , 样品 3 的周期为 185\AA .

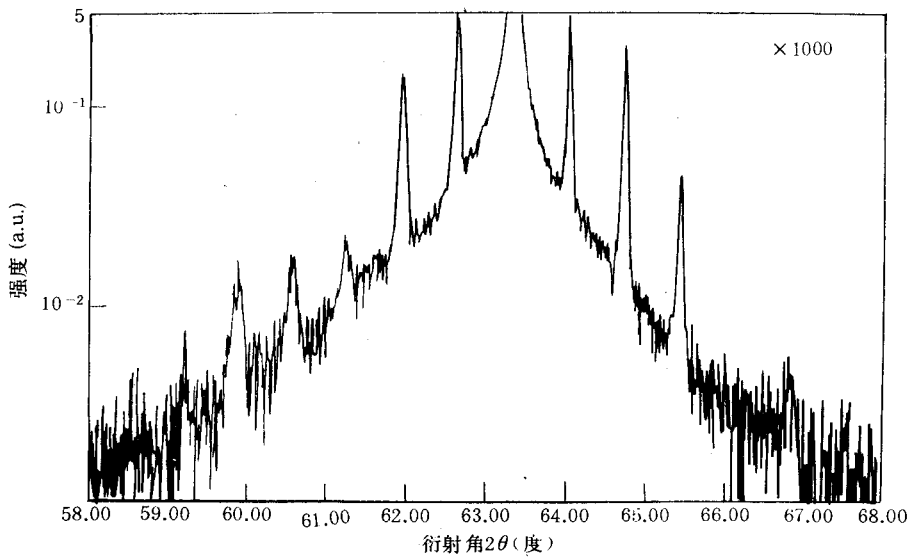


图 1 样品 1 的双晶 X-射线衍射扭摆曲线(x1000)

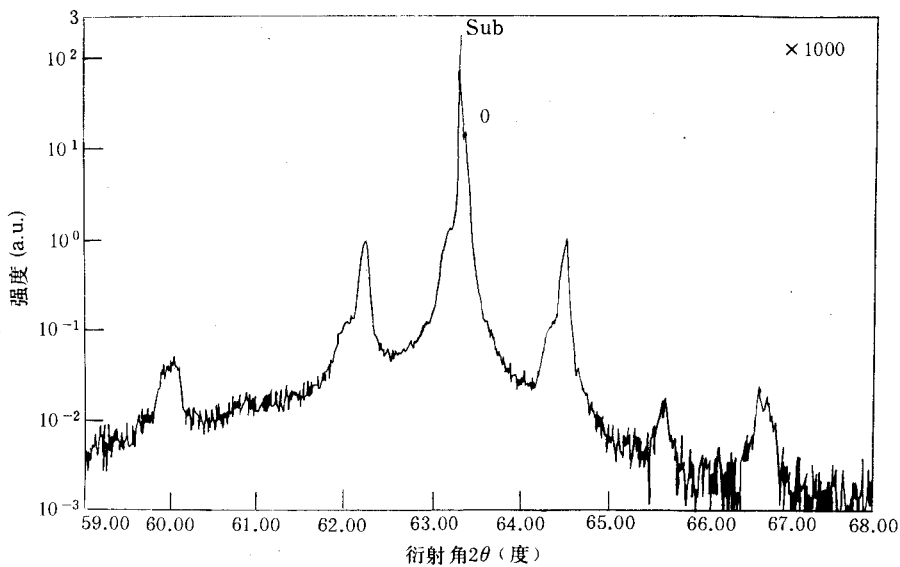


图 2 样品 2 的双晶 X-射线衍射扭摆曲线(x1000)

3. 计算 $In_xGa_{1-x}As$ 阱层的 In 组分 x : 衬底的厚度至少比外延层大两个数量级, 因此可以忽略衬底的形变. 垒层 InP 衬底同材料, 故可认为垒层不发生应变, 因而应变主要集中在阱层 InGaAs 中. 由于阱层 InGaAs 的厚度小于其临界厚度, 且超晶格层的总厚度小于超晶格的临界厚度, 因此, 在生长平面上各层都具有与衬底相同的晶格常数, 即 $a_{//} = a(InP)$. 垂直于生长平面方向上的晶格常数可由公式 $\Delta a_{\perp} / a_s = -ctg\theta_s \cdot \Delta\theta_0$ 求出, 其中 θ_s 是衬底的 Bragg 角, $\Delta\theta_0$ 是超晶格零级卫星峰与衬底衍射峰 Bragg 角之差. 根据弹性理论, $\Delta a_{\perp} / a_s = (\Delta a_{\perp} / a_s) \cdot [(1-V)/(1+V)]$, 其中 $\Delta a_{\perp} = a_t - a_s$, a_t 是阱层 InGaAs 在自由状态下的晶格常数, V 为 $In_xGa_{1-x}As$ 材料的 Poisson 比, $V = c_{12} / (c_{11} + c_{12})$, c_{11} 和 c_{12} 是 $In_xGa_{1-x}As$ 的弹性模

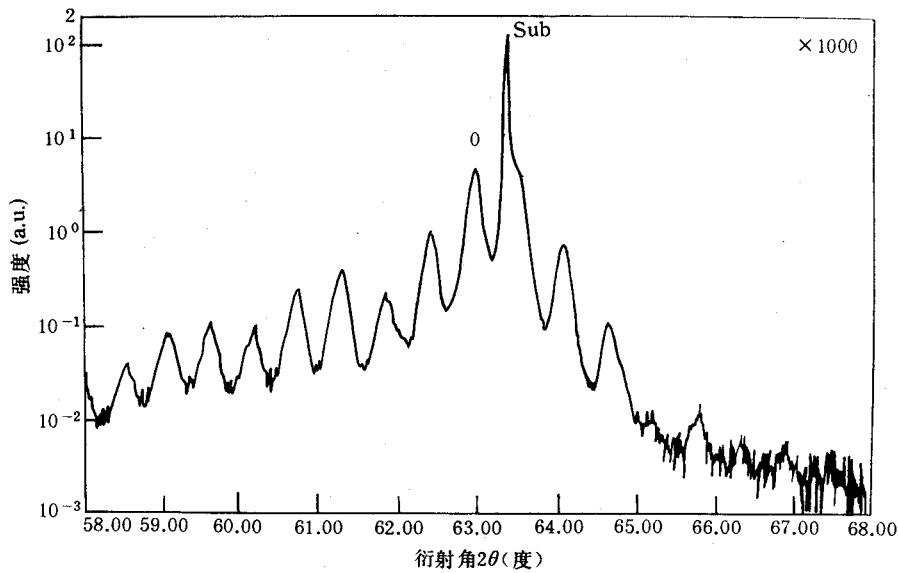


图3 样品3的双晶X-射线衍射扭摆曲线

量. 由上面的关系式求出 a_r 后, 即可由 Vegard 定律求出 In 组分 x . 计算结果如下: 对样品 1, $x=0.53$; 对样品 2, $x=0.519$; 对样品 3, $x=0.569$.

4 结论

我们在国产第一台 CBE 设备上, 用 GSMBE 技术研究了 InGaAs/InP 匹配和应变多量子阱超晶格材料的生长, 用不对称切换方法成功地生长了高质量的匹配和正负应变超晶格材料, 并用双晶 X-射线衍射技术对样品进行了测试和分析. 获得如下结果: ①匹配超晶格材料可看到 7 级单边卫星峰, 周期为 149 \AA ; ②负失配超晶格, 可看到 5 个单边卫星峰, 周期为 94 \AA , $\Delta a_{\perp}/a_s = -1.64 \times 10^{-3}$, In 组分 $x=0.519$; ③正失配超晶格, 可看到单边 12 个卫星峰, 周期 185 \AA , $\Delta a_{\perp}/a_s = 5.30 \times 10^{-3}$, 阱中 In 组分 $x=0.569$. 三种超晶格的设计阱宽为 $40-50 \text{ \AA}$, 周期数为 40. 上述结果表明, 我们在国产第一台 CBE 设备上用 GSMBE 技术采用非对称切换方法生长的 InGaAs/InP 超晶格材料质量很好.

致谢 中国科学院半导体所的王玉田同志对样品进行了双晶 X-射线衍射测试, 特表感谢.

参 考 文 献

- [1] A. R. Adams, *Electron. Lett.*, 1986, **22**(5):249.
- [2] H. Temkin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(13):1210.
- [3] A. Kawkawa *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(20):2486.
- [4] Naresh *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(16):1704.
- [5] B. Elman *et al.*, *Electron. Lett.*, 1991, **27**:2032.
- [6] C. J. Chang-Hasnain, *Electron. Lett.*, 1993, **29**:1.

Study on GSMBE Growth of InGaAs/InP Superlattice Materials

Sun Dianzhao, Wang Xiaoliang*, Li Xiaobing Guo Hongxi
Yan Chunhui, Li Jianping, Zhu Shirong, Li Lingxiao,
Zen Yiping, Kong Meiyong and Hou Xun*

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

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)*

Received 8 June 1994, revised manuscript received 5 October 1994

Abstract This paper reports for the first time in China the successful growth of InGaAs/InP nonstrained and strained layer superlattices with 40 periods on (100) InP substrates by GSMBE method using the first China-made CBE system. The samples have been characterized by high-resolution X-ray diffractometer, and In composition in the InGaAs well layers has been calculated. The results show that the superlattices have a high quality.

PACC: 8115G, 6865