

为 20nm , 顶层为 20nm 的 InP . 阱层和垒层均未有有意掺杂. 阱宽和垒宽由反射高能电子衍射 (RHEED) 的强度振荡测得的生长速率和生长时间之积得到.

为了用双晶 X 射线衍射测量确定阱层中的实际 In 组份, 我们用同样生长条件生长了一个 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (5nm)/ InP (20nm) 压应变多量子阱样品 SL 196, 该样品上多量子阱的周期为 25nm , 周期数为 20.

1.2 样品生长

样品用国产 GSMBE 设备生长, 固态 In 源和 Ga 源的纯度分别为 7N 和 8N, 气态源为浓度为 100% 的高纯 AsH_3 和 PH_3 . 生长温度约为 500°C . AsH_3 和 PH_3 的流量均取 $8\sim 10\text{SCCM}$, AsH_3 、 PH_3 裂解炉温度为 950°C . $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 阱和 InP 垒生长速率均为 1.0ML/s (0.293nm/s). 生长速率用反射高能电子衍射 RHEED 测量. 各层的生长时间由各层的厚度和生长速率决定. 除缓冲层外, 其余各层的生长均用计算机自动控制. 用 1 号

In 束源炉 In (1) 生长 InP 垒, 用 2 号 In 束源炉 In (2) 生长 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 阱层. 先在 InP 衬底上生长一层 300nm 的 InP 缓冲层, 然后在缓冲层上依次生长 InP 垒和 InGaAs 阱, 生长过程如图 1 所示. 生长完 InP 垒后, 首先用 PH_3 (主要成份为 P_2) 保护 InP 表面, 时间为 T_1 , 然后关 PH_3 , 通 AsH_3 (主要成份 As_2), 时间为 T_2 ; 接着生长 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 阱. 生长完 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 阱后, 持续通 AsH_3 , 时间为 T_3 , 然后关 AsH_3 通 PH_3 , 时间为 T_4 , 再开始生长 InP 垒. 由图 1 可见, 在 $\text{In}_{0.63}$

$\text{Ga}_{0.37}\text{As}/\text{InP}$ 界面, 生长间断 ($T_1 + T_2$), 在 $\text{InP}/\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 界面, 生长间断 ($T_3 + T_4$). 考虑到 As_2 比 P_2 具有更大的粘附系数以及置换效应和记忆效应的影响, 我们取 ($T_1 + T_2$) = $5s$, ($T_3 + T_4$) = $10s$.

2 结果和讨论

2.1 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 阱层中 In 组份的确定

用日本理学 (Rigaku) SLX-1AL 型超晶格测定装置对样品 SL 196 进行了双晶 X 射线衍射 (DCXRD) 测试, 结果示于图 2. 由图 2 可以清晰地看到 8 个卫星峰, 这 8 个卫星峰相对衬底峰不对称, 衬底峰左侧卫星峰多, 右侧少, 说明阱层中 In 组份 $x > 0.53$, 即样品为压应变多量子阱样品. 为了准确地确定阱层中的 In 组份, 我们对所测得的 DCXRD 摇摆曲线进行了计算机模拟^[13], 结果如图 2. 由模拟得到阱层中的 In 组份为 $x = 0.63$, 由此, 并利用 Vegard 公式, 容易得到 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 阱层相对于 InP 衬底的晶格失配为 0.68% . 应用力平衡模型^[14]算出与该晶格失配相应的单 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}$ 外延层的临界厚度约为 14.6nm , 单 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}/\text{InP}$ 量子阱的临界厚度约为 34.7nm . 应用能量平衡模型^[15]可算出与该晶格失配

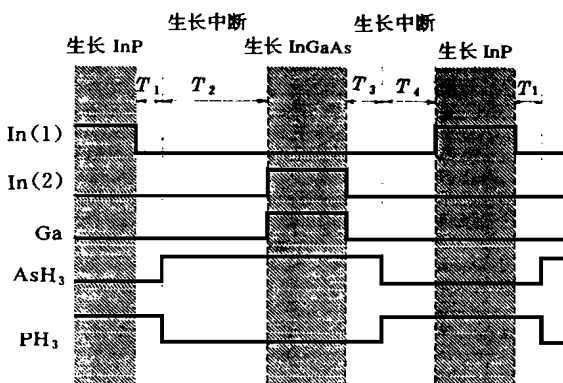


图 1 生长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ 应变量子阱的切换时序

Fig. 1 Switching sequence for the growth of strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ quantum wells

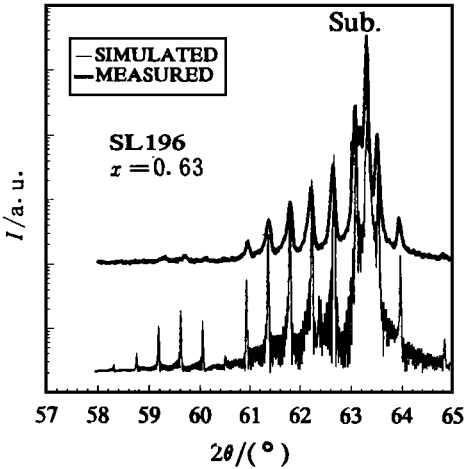


图 2 应变多量子阱样品 SL196 的双晶 X 射线衍射摇摆曲线及其计算机模拟结果

Fig.2 Double crystal X-ray diffraction rocking curve and its computer simulated result for strained multiple quantum well sample SL196

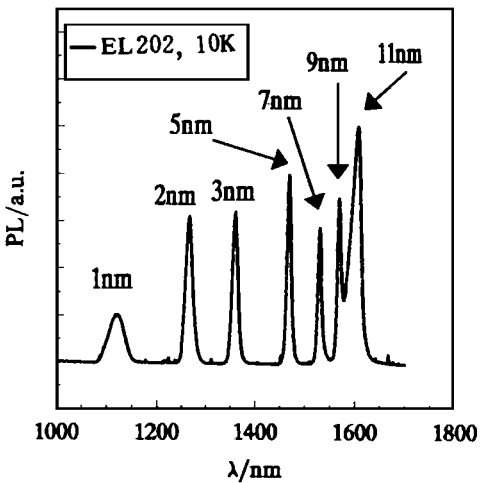


图 3 压应变 In_{0.63}Ga_{0.37}As/InP 量子阱样品 EL202 在 10K 时的光致发光光谱

Fig.3 PL spectrum at 10K for strained In_{0.63}Ga_{0.37}As/InP quantum well sample EL202

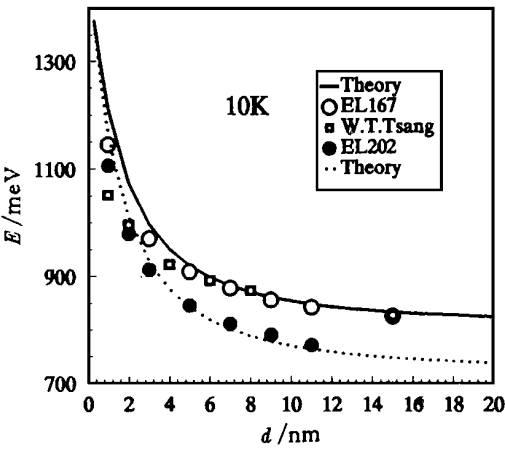


图 4 10K 时 In_{0.63}Ga_{0.37}As/InP 量子阱中 (样品 EL202) 激子跃迁能量随阱宽的变化关系

Fig.4 Photoluminescence line energies as a function of well width at 10K for sample EL202, also shown on the same plot are the theoretical curves and 2K PL results obtained by Tsang

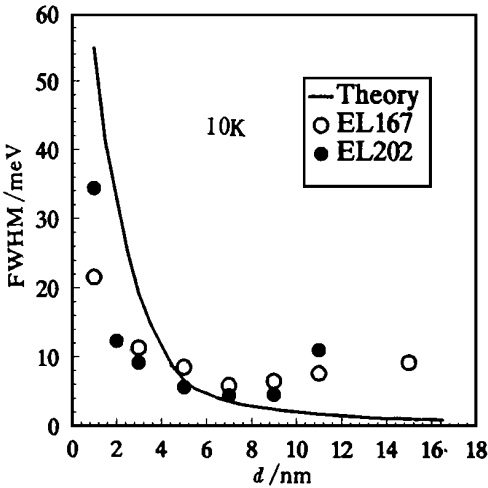


图 5 样品 EL202 在 10K 时光致发光谱峰的半高宽与阱宽的关系

Fig.5 The full width at half maximum of the PL peaks as a function of well width for sample EL202 at 10K, also shown is the theoretical linewidth broadening fluctuation of the well width

相应的临界厚度约为 202.2nm。由于样品 EL202 上各阱层的厚度(最大为 11nm)均小于其相应失配度下的临界厚度,因此可认为各阱层均未发生弛豫,即阱层与 InP 衬底共格,因而阱层所发生的平面双轴应变为 0.68%。

2.2 低温光致发光测试结果

对所生长的样品 EL202 进行了低温光致发光谱测试. 光致发光测量以 He-Ne 激光器作为激励光源, He-Ne 激光器的发射功率为 1.0 mW. 光致发光经光栅单色仪、由液氮冷却的 Ge 探测器接收, 信号经锁相放大器放大后接收, 整个测量过程用计算机控制.

图 3 给出样品 EL202 的光致发光谱, 由图中我们可以看到 7 个尖锐的激子发光峰, 这 7 个峰分别对应于单应变量子阱样品上的 7 个单应变量子阱.

2.3 应变量子阱中的激子跃迁能量

图 4 给出了在 10K 时 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 压应变量子阱中激子跃迁能量随阱宽变化的关系. 为了进行比较, 图 4 给出了我们生长的匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 单量子阱样品 EL167 的 10K 光致发光测试结果^[16], 图 4 还给出了 W·T·Tsang^[17]用 CBE 方法生长的匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 量子阱样品的光致发光测试结果. 用文献[18]给出的计算方法和参数对应变 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}/\text{InP}$ 量子阱中的激子跃迁能量进行了理论计算, 计算结果为图 4 中的点线. 由图 4 我们可以看出: (1) 随着阱宽增大, 阱中激子跃迁能量减小, 这是由于宽阱的量子尺寸效应小的缘故. (2) 对同一阱宽, +0.68% 压应变单量子阱样品 EL202 中的激子跃迁能量小于我们生长的匹配量子阱样品中的激子跃迁能量, 也小于匹配量子阱中激子跃迁能量的计算值. (3) 与 W·T·Tsang^[17]的实验结果相比, 当阱宽大于等于 2 nm 时, 样品 EL202 中的激子跃迁能量小于 W·T·Tsang^[17]样品的实验结果; 当阱宽小于 2 nm 时, EL202 样品的实验结果大于 W·T·Tsang 样品的实验结果. (4) 阱宽越大, 因应变导致的激子跃迁能量的差别越大; 阱宽越小, 因应变导致的激子跃迁能量的差别越小, 这说明窄阱中, 量子尺寸效应引起的能量变化起主要作用, 宽阱中, 应变及组份引起的能量变化起主要作用. (5) 对 $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}/\text{InP}$ 压应变量子阱, 实验结果与理论计算结果符合得很好.

2.4 压应变量子阱中的激子跃迁谱峰的半高宽

图 5 给出了样品 EL202 的 10K 光致发光谱的半高宽与匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 量子阱样品 EL167 测试结果^[16]及理论计算结果的对比, 图中实线表示量子阱界面起伏一个单层 (0.293 nm) 时谱峰展宽的理论计算值^[16,19]. 从图 5 我们可以看出: (1) 与样品 EL167 一样, 当阱宽小于 4 nm 时, 样品 EL202 的 FWHM 小于理论计算值. (2) 当阱宽等于 1 nm 时, 样品 EL202 的 FWHM 为 34.4 meV. (3) 当阱宽在 5~7 nm 之间时, EL202 半峰宽最小, 对 7 nm 和 9 nm 的阱, 半峰宽仅为 4.5 meV. (4) 图中所示样品 EL167 和 EL202 的半峰宽随阱宽的变化规律相同, 先是随阱宽的增大而减小, 在某一阱宽处达到最小值后, 然后半峰宽有上升的趋势. 其原因我们在文献[16]中已作了简要讨论.

样品 EL202 窄阱的半峰宽小于量子阱界面起伏一个单层时的理论展宽值, 说明 0.68% 平面双轴压应变量子阱样品 EL202 上量子阱界面起伏小于一个单层. 样品 EL202 上量子阱在 10K 时光致发光谱的半高宽不大于具有相同阱宽的其它匹配量子阱样品在 10K 时的光致发光谱的半峰宽, 说明应变量子阱样品 EL202 具有均匀的应变, 且实现了共格生长. 这一点与阱宽小于 0.68% 所对应的临界厚度相一致. 以上结果说明, 我们用国产 GSMBE 设备成功地生长出了高质量的具有平面双轴压应变的单量子阱样品.

3 结论

中国知网 <https://www.cnki.net>

在国产 CBE 设备上, 用 GSMBE 方法在国内首次生长出了高质量的具有不同阱宽的

$\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}/\text{InP}$ 压应变量子阱结构材料. 用双晶 X 射线测量和计算机模拟确定出了阱层 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中的 In 组份. 用低温光致发光谱对材料的特性进行了分析研究, 确定了压应变量子阱中的激子跃迁能量, 当阱宽从 1nm 变化到 11nm 时, 量子阱中激子跃迁能量从 1.106eV 变化到 0.772eV, 量子阱的界面具有原子级的平整度. 当阱宽为 7nm 和 9nm 时, 相对应的 10K 光致发光谱的半高宽为 4.5meV.

致谢 感谢林兰英院士的关怀和鼓励. 中国科学院半导体所王玉田副研究员以及庄岩同志对样品进行了双晶 X 射线衍射测量, 徐仲英研究员和袁之良博士对样品进行了低温光致发光谱测试, 在此向他们表示感谢.

参考文献

- 1 Osbourn G C, *J. Appl. Phys.*, 1982, **53**:1586
- 2 Adams A R, *Electron. Lett.*, 1986, **22**:249
- 3 Wang C A, *et al. J. Electron. Materials*, 1993, **22**:1365
- 4 Seki S, *et al. J. Appl. Phys.*, 1994, **75**:1299
- 5 Chong T C, *et al. IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **QE-25**:171
- 6 Rapp S, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**:67
- 7 Chen T R, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**:2621
- 8 Chen J, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**:1116
- 9 Teng D, *et al. Cryst. Growth*, 1994, **135**:36
- 10 Zhang F C, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**:85~87
- 11 Averbek R, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**:1732
- 12 Anan T, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**:1047
- 13 Speriosu V S, *et al. Appl. Phys.*, 1984, **58**:1591; *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**:6094
- 14 Matthew J W, *et al. J. Cryst. Growth*, 1974, **27**:118; *J. Cryst. Growth*, 1975, **29**:273; *J. Cryst. Growth*, 1976, **32**:265
- 15 People R, *et al. Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**:322; *IEEE J. Quantum Electron*, 1986, **QE-22**:1696
- 16 Wang Xiaoliang, Sun Dianzhao, Kong Meiying, *et al. J. Cryst. Growth*, 1996, **164**:281
- 17 Tsang W T, *J. Cryst. Growth*, 1987, **81**:261
- 18 Gershoni D, Temkin H, Panish M B, *et al. Physical Review B*, 1989, **39**:5531
- 19 Tsang W T, Schubert E F, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**:220

STUDY OF GSMBE GROWTH AND CHARACTERISTICS OF COMPRESSIVELY STRAINED $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}/\text{InP}$ QUANTUM WELLS^{*}

Wang Xiaoliang Sun Dianzhao Kong Meiyong Hou Xun^{**}

Zeng Yiping Li Jianping Li Lingxiao Zhu Shirong

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

Abstract High quality compressively strained quantum wells with different well widths ($1\sim 11\text{nm}$) were grown for the first time in China using the home-made GSMBE system. By means of double crystal X-ray diffraction measurement and its computer simulation, the indium composition in the wells of the sample was determined. Sharp and intense peaks for each well can be well resolved in the 10K PL spectra. For wells narrower than 4nm , the line widths of the peaks are smaller than the theoretical values of line width broadening due to one monolayer interface fluctuation, showing that the interface fluctuation of the sample is within one monolayer. For wells of 7nm and 9nm , the peak widths are as low as 4.5meV .

Key words molecular beam epitaxy, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$, quantum wells, photoluminescence.