

MOVPE 生长 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构的光致发光*

董建荣 陆大成 汪 度 王晓晖 刘祥林 王占国

(中国科学院半导体研究所 半导体材料科学实验室 北京 100083)

摘要 用常压 MOVPE 系统, 采用 AsH_3 、国产 TMGa 和 TMAI 生长了 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构。在 11K 下, 宽度为 10 Å 的阱 PL 半峰宽最窄为 12 meV, 表明量子阱结构具有陡峭的界面。光致发光(PL)测试结果显示, 较低的生长速率和适当的生长中断时间有利于改善 PL 半峰宽。

PACC: 6855, 7340L, 7855

1 引言

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 体系广泛应用于电子和光电器件中, 如 HEMET 和激光器。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 材料可用多种生长技术 MBE, LPE 和 MOVPE 等生长。随着 MOVPE 技术的发展, MOVPE 可以生长出其光学性质和 MBE 相比的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱^[1]。在量子阱结构的生长中, 其中一个很重要的方面就是如何控制 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 的界面平整度。异质界面的平整度影响到 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 二维电子气(2DEG)的迁移率, 从而成为限制 HEMET 器件速度的重要因素。界面粗糙还会影响量子阱的光学性质, 尤其是当量子阱的宽度较窄时, 界面的起伏对量子阱的光学性质影响越来越大, 表现在光致发光(PL)谱半峰宽(FWHM)的展宽^[2]和 PL 谱的分裂^[3]。生长速率, 温度和界面处生长中断都会影响 PL 谱的半峰宽^[1,4]。光致发光作为半导体材料光学测试的一种很严格的手段, 常用于获得量子阱结构的一些重要信息, 如量子阱的阱宽, 量子阱中组分的均匀性(三元合金作阱的情形), 势垒组分的均匀性和界面处的平整度等等。

本文中, 用常压 MOVPE 在不同条件下生长了不同阱宽的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱, 用光致发光测量了这些量子阱结构的光学性质, 并对结果进行了分析比较。

2 实验

样品是在本实验室自行研制的常压 MOVPE 系统上生长。该生长系统具有良好的压力

* 国家自然科学基金资助项目

董建荣 男, 1967 年生, 目前主要从事 GaInP/GaAs 材料的生长及其性质研究
1994 年 9 月 28 日收到初稿, 1995 年 5 月 31 日收到修改稿

平衡控制和经过优化设计的反应管形状, 为生长具有陡峭界面的异质结构和量子阱结构创造了良好的条件。衬底为(100)半绝缘 GaAs。Ⅲ族的 Ga 源和 Al 源分别为国产三甲基镓(TMGa)和三甲基铝(TMAI), V 族源为 100% 的 AsH_3 。GaAs 衬底先在有机溶剂中去油, 然后在 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=5:1:1$ 中腐蚀几分钟, 再用去离子水清洗, 待衬底表面脱水后, 装入反应室通 H_2 。GaAs 衬底经高温脱氧化层处理之后, 先生长约 2000 Å 的 GaAs 缓冲层, 然后通过 MO 源的切换来生长 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构。生长温度 $\sim 750^\circ\text{C}$, V / Ⅲ 比 ~ 50 , 总氢气流量约为 10sl/min (sl 为标准升), 衬底上方平均气流速率大于 20cm/s。生长过程中从 GaAs 到 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 和从 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 到 GaAs 界面处都采用生长中断, 以保证气流的切换较为完全。源的切换过程和生长中断如图 1 所示。 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 垒的厚度为 500 Å, GaAs 阵的宽度沿生长方向依次为 100 Å, 60 Å, 45 Å, 30 Å, 15 Å 和 10 Å。GaAs 的生长速率为 $2.23 \sim 5 \text{ \AA/s}$, $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 的生长速率为 $3.7 \sim 7.1 \text{ \AA/s}$, 前者是根据 GaAs/AlAs 布拉格反射器的 X 光衍射计算得到, 后者由 GaAs 和 AlAs 的生长速率估计。

3 结果及分析

对这些量子阱结构在 11K 下进行了 PL 测试, 激发源为 He-Ne 激光器。激发功率为 1mW。对于 9342# 样品, 最窄的 10 Å 阵的 PL 谱半峰宽只有 12meV, 对应于 15 Å, 30 Å, 45 Å, 60 Å 和 100 Å 阵的半峰宽分别为 16.5meV, 16.6meV, 10.9meV, 10.4meV 和 7.8meV。如图 2 所示。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱结构中, PL 谱半峰宽的展宽机理主要有以下几种:

(1) 由于载流子浓度较高而造成的阱中子带填充, (2) 阵宽起伏引起的激子能量移动, (3) 垒中组分不均匀导致的有效势垒高度变化, (4) 界面处的结构缺陷^[5], (5) 垒的合金组

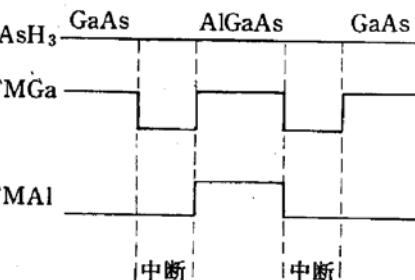


图 1 量子阱生长中源的切换过程

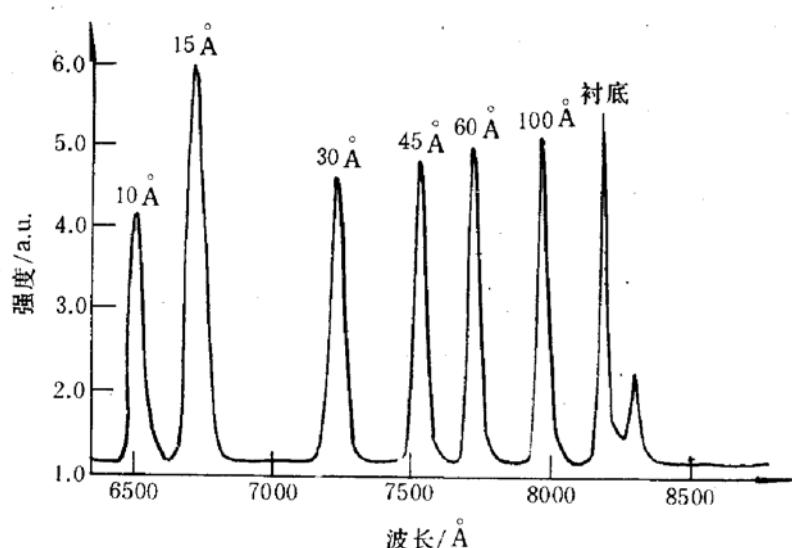


图 2 9342# 样品的 PL 谱 (11K)

$r = 2.23 \text{ \AA/s}$, $T_g = 750^\circ\text{C}$, $t_{in} = 5\text{s}$.

分^[6]。以 10 Å 阵为例, 若其 PL 谱半峰宽主要是由 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 界面不平整即阱宽起伏所造成的, 则根据一简单计算式 $\Delta E = (dE/dL_z) \Delta L_z$ 估计得到, 对应于 12meV 的半峰宽, 阵宽起伏小于 $0.5a_0$ (a_0 为 GaAs 的晶格常数)。这一结果和 J. C. van der Poel 等人^[7] 1992 年报道的 $\text{Al}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱的 PL 谱半峰宽相当 (考虑 Al 组分不同)。说明我们生长的量子阱结构具有陡峭的界面。

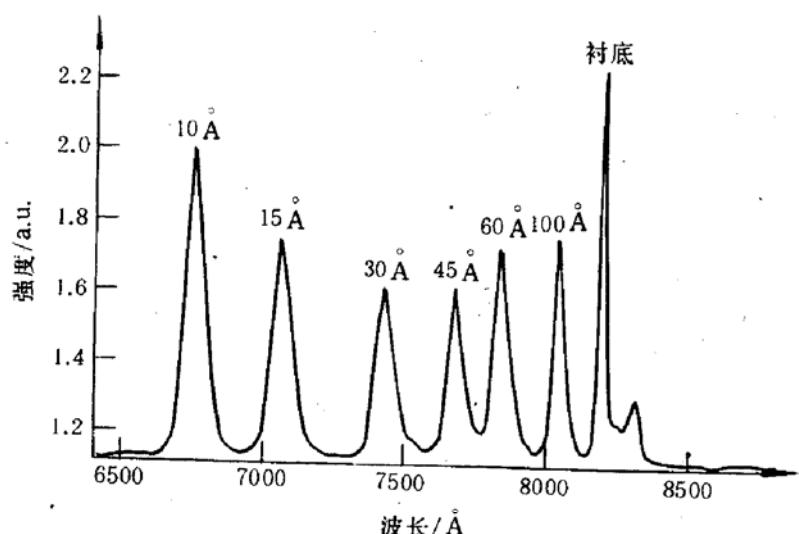


图3 9343#样品的PL谱(11K)
 $r=5\text{ \AA/s}$, $T_g=770^\circ\text{C}$, $t_{in}=5\text{s}$.

时间(5s到20s),半峰宽又变宽.可见,较低的生长速率有利于减小半峰宽,而生长中断时间太长不利于半峰宽的改善.至少在生长速率从 5 \AA/s 到 2.23 \AA/s 和生长中断时间从5s到20s是如此.

表1中不同样品对应阱PL峰能并不相同,而是有一定的分散.这些能量的分散对应于阱宽变化约 $\pm 0.5\alpha_0$.由此可见,阱宽控制的重复性比较好.

我们生长的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱的PL谱中,另一个很明显的特征就是随着GaAs阱宽变窄,PL谱半峰宽先增大,然后又减小.本文中样品的最外一层为 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$.若样品表面对离表面最近的即最窄阱的PL谱有影响,则最外层 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ 越薄其影响越大.9343#的最外层垒厚为 1000 \AA ,其它两个样品的外层垒为 2000 \AA .9343#样品 10 \AA 阱PL半峰宽相对于 15 \AA 阱半峰宽的减小量并不比其他两个样品的大,因而可以排除最窄阱的PL谱半峰宽变窄与其离表面最近有关这种可能性.最窄阱的PL谱半峰宽变窄的一个很可能的原因是随着阱宽从 15 \AA 减到 10 \AA ,PL半峰宽的展宽机理由一种过渡到另一种.至于何者在哪一范围内占主导地位还尚难确定.但有一点几乎是可以肯定的,就是阱宽起伏在我们生长的量子阱结构中不是主要因素.

图3,4为其它两种条件下生长的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构的PL谱.样品的生长条件分别为:9343#, $r=5\text{ \AA/s}$, $T_g=770^\circ\text{C}$, $t_{in}=5\text{s}$ (生长中断时间);9344#, $r=2.23\text{ \AA/s}$, $T_g=750^\circ\text{C}$, $t_{in}=20\text{s}$.为了便于比较,将各样品PL峰能及半峰宽的值列于表1中.首先比较一下不同生长条件制备的样品对应各阱的PL谱半峰宽.当将生长速率从 5 \AA/s 降到 2.23 \AA/s 时,半峰宽变窄,与Dupuis等人的报道结果一致^[1].延长界面处的生长中断

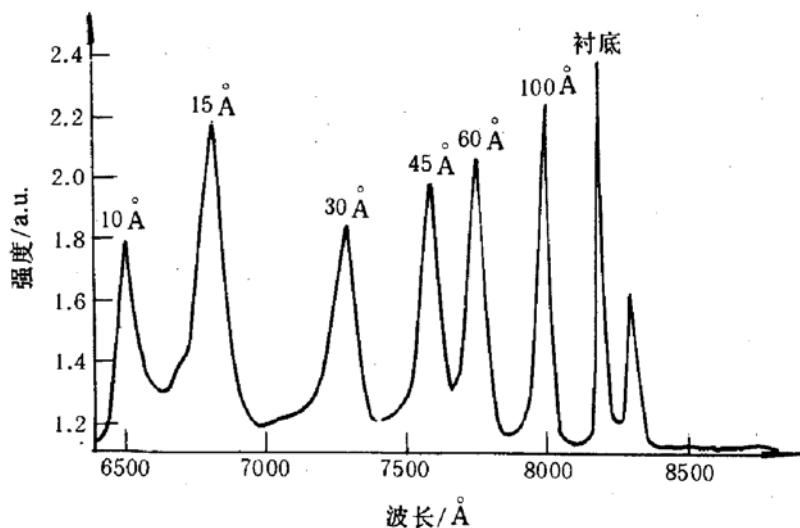


图4 9344#样品的PL谱(11K)
 $r=2.23\text{ \AA/s}$, $T_g=750^\circ\text{C}$, $t_{in}=20\text{s}$.

表 1 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构的 PL 峰能及半峰宽

样品	阱宽/ \AA					
	100	60	45	30	15	10
9343# 峰能/eV FWHM/meV	($r=5 \text{\AA/s}$, 1.5423 7.7)	($T_g=770^\circ\text{C}$, 1.5836 14.2)	($t_{in}=5\text{s}$) 1.6166 13.5	1.6712 18	1.7564 23.4	1.8370 19.6
9342# 峰能/eV FWHM/meV	($r=2.23 \text{\AA/s}$, 1.556 7.8)	($T_g=750^\circ\text{C}$, 1.6056 10)	($t_{in}=5\text{s}$) 1.6461 10.9	1.7141 16.6	1.8444 16.5	1.9045 12
9344# 峰能/eV FWHM/meV	($r=2.23 \text{\AA/s}$, 1.5500 11.6)	($T_g=750^\circ\text{C}$, 1.5977 16.5)	($t_{in}=20\text{s}$) 1.6337 19.4	1.7009 23.3	1.8182 29.3	1.9065 20.5

4 结论

在11K下用光致发光研究了常压MOVPE生长的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构的光学性质。结果显示,10 \AA 阱PL半峰宽最窄为12meV,表明该多量子阱结构具有较陡峭的界面。不同条件生长的 $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱结构的PL谱半峰宽的对比显示,较低的生长速率(2.23\AA/s)有利于半峰宽的减小,而界面处生长中断时间太长(20s)却不利于半峰宽的改善。另外,发现最窄量子阱的PL半峰宽并不是最宽,这可能是随阱宽变窄,PL谱半峰宽的展宽由一种机理过渡到另一种机理所致。以上只是一些初步的结果,更细致的实验和分析工作还有待于进一步的研究。

致谢 TMGa 和 TMAI 由南京大学化学系金属有机物教研室提供,在 X 光双晶衍射和光致发光测试方面分别得到王玉田和徐仲英同志的帮助,作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. D. Dupuis, J. G. Neff and C. J. Pinzone, J. Crystal Growth, 1992, **124**:558~564.
- [2] S. Hong and J. Singh, Appl. Phys. Lett., 1986, **49**(6):331~333.
- [3] D. Bimberg, J. Christen, T. Fukunaga *et al.*, J. Vac. Sci. Technol., 1987, **B5**(4):1191~1197.
- [4] R. F. Kopf, E. F. Schubert, T. D. Harris *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1991, **58**(6):631~633.
- [5] D. F. Welch, G. W. Wicks and L. F. Eastman, Appl. Phys. Lett., 1985, **46**(10):991~993.
- [6] S. B. Ogale, A. Madhukar, F. Voillot *et al.*, Phys. Rev., 1987, **B36**(3):1662~1672.
- [7] C. J. van der Poel, H. P. M. M. Ambrosius, R. W. M. Linders *et al.*, J. Crystal Growth, 1992, **124**:300~306.

Photoluminescence of $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ Quantum Wells Grown by Metalorganic Vapor Phase Epitaxy

Dong Jianrong, Lu Dacheng, Wang Du, Wang Xiaohui,
Liu Xianglin and Wang Zhanguo

(*Lab. of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 28 September 1994, revised manuscript received 31 May 1995

Abstract $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}/\text{GaAs}$ Multiple Quantum Well (MQW) structures were grown by atmospheric metalorganic vapor phase epitaxy (MOVPE) using home-made sources TMGa and TMAI. The photoluminescence (PL) measurements were carried out at 11K to characterize the optical properties of the QW structures grown at different growth rates and with varied growth interruption times. The narrowest PL full width at half maximum (FWHM) of 10 Å well is 12meV, indicating abrupt AlGaAs/GaAs interfaces. The results of PL measurements show that low growth rate and proper growth interruption time are helpful to obtain narrower FWHM.

PACC: 6855, 7340L, 7855