

用 LPE 生长 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 量子阱结构的研究

邢启江 王舒民 王若鹏 陈娓兮 章 蓓 赵沧桑 党小忠 虞丽生

北京大学物理系, 北京 100871

(1992 年 1 月 27 日收到; 1992 年 8 月 27 日收到修改稿)

在国内首次利用 LPE 生长技术在 n-InP(100)衬底上成功地生长 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP 分别限制单量子阱结构。通过对样品的横截面进行的 TEM 观测, 量子阱的阱宽和过渡层的厚度分别为 160\AA 和 30\AA 。在 10K 和 77K 光致发光谱测量中, 我们观察到 $n=1$ 的子能级上电子到重、轻空穴带很强的自由激子跃迁峰, 两峰间隔为 8.3meV , 在低温条件下光致发光谱的半高宽度为 20meV 。

PACC: 6855, 8115L, 7340L, 7865

一、引言

随着晶体生长技术的不断发展, 特别是分子束外延(MBE)和金属有机物化学气相沉积(MOCVD)等先进技术的成功应用, 超晶格和量子阱结构无论在理论上还是在应用技术上的研究都取得了很大的进展。目前人们已经能生长出各种类型、性能独特的半导体超晶格。由于能带边组合、生长取向和应变状况等不同, 半导体超晶格可以显现完全不同的物理特性, 从而导致了半导体超晶格和量子阱结构有着广泛的应用前景。特别是在半导体量子阱激光器, 新型高速光电子调制器件, 非线性光学材料和红外探测器等领域。

到目前为止, 超晶格和量子阱结构的制备主要靠 MBE 和 MOCVD 等先进技术设备来实现的。这是因为液相外延(LPE)的生长速率与 MBE 和 MOCVD 生长技术相比要大得多, 因而很难生长出足够薄且能显示量子尺寸效应的外延层。然而, 由于 LPE 以其设备简单、造价低廉、便于广泛推广使用等独特优点一直吸引着人们做出不断的努力, 国外文献陆续报道了用 LPE 技术生长出 AlGaAs/GaAs, InGaAsP/InP 量子阱结构, 并且做成了量子阱激光器^[1-3]。

本文报道我们利用 LPE 生长技术成功地生长了 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 分别限制单量子阱结构, 并且对量子阱结构的光致发光谱及其横截面的 TEM 观测结果作了详细的介绍。

二、样品的结构及其制备

实验是在一台国产的 CWL-1 型程序控制液相外延水平生长炉上进行的。在 645°C 生

长温度下,我们利用过冷法且用快速滑动生长技术^[3],在 n-InP(100)衬底上成功地生长出如图 1 所示的量子阱结构层。经回熔以后的 InP 衬底上逐层生长:①n-InP 缓冲层,② $1.03\mu\text{m}$ InGaAsP 层,③ $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP 量子阱层,④ $1.1\mu\text{m}$ InGaAsP 层,⑤ $1.03\mu\text{m}$ InGaAsP 层,⑥不掺杂的 InP 层,该层起着减小 Zn 扩散进入波导层的作用^[4],⑦P-InP 包层,⑧P⁺-InGaAsP 接触层。如果我们把各层按其禁带宽度来描述,这种量子阱结构具有如图 2 所示的“漏斗”形状(见图版 I)。用这种分别限制量子阱结构做成的量子阱激光器能有效地收集非平衡载流子使之产生受激发射,同时也提高了对光场限制的能力^[5]。

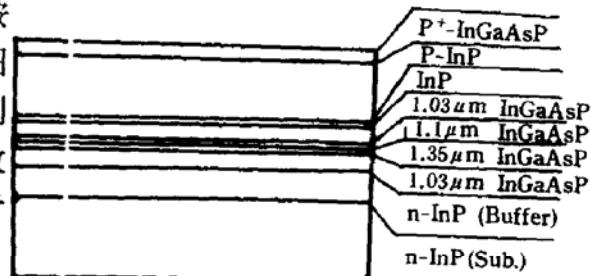


图 1 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 分别限制单量子阱结构
外延片层次示意图

三、测量结果与讨论

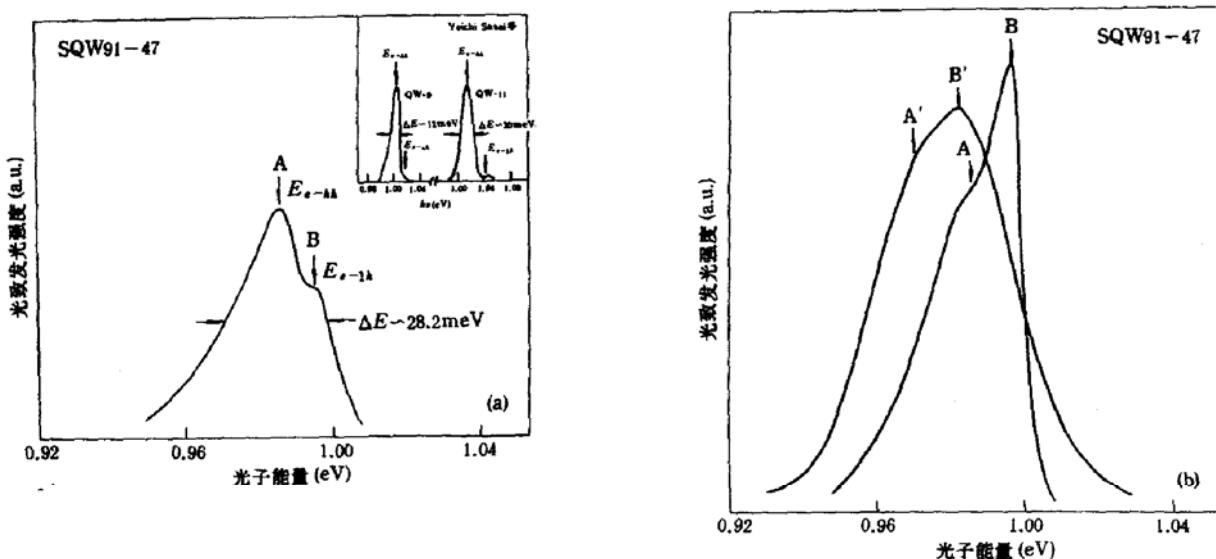
在 100 万伏高压透射电镜下,观察液相外

延片横截面得到的 TEM 照片如图 3 所示(见图版 I)。图中显示的四个区域自下而上分别对应着 $1.03\mu\text{m}$ InGaAsP 层($d_2=460\text{ \AA}$), $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP 量子阱层($L_r=160\text{ \AA}$), $1.1\mu\text{m}$ InGaAsP 层($d_4=250\text{ \AA}$),和 $1.03\mu\text{m}$ InGaAsP 层($d_5=460\text{ \AA}$)。在 $1.03\mu\text{m}$ InGaAsP 层与 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP 量子阱层之间存在着约为 30 \AA 左右的过渡层。而在量子阱层与 $1.03\mu\text{m}$ InGaAsP 层之间,由于增加 $1.1\mu\text{m}$ InGaAsP 防回熔层,使阱层边缘变锐。可见,在 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 分别限制量子阱结构中, $1.1\mu\text{m}$ InGaAsP 层起着改善量子阱结构界面的作用^[6]。

我们利用 Jobin-Yvon HRD1 型双光栅单色仪,在不同的温度条件下测量了非掺杂样品的光致发光谱。激发光源采用波长为 5145 \AA 的氩离子激光器,利用液氮冷却的锗探测器接收光致发光信号。在 10K 温度下,用 0.77W/cm^2 的激发光功率密度,测得 SQW91-47 样品的光致发光谱如图 4(a)所示。A 和 B 峰所对应的光子能量分别为 0.9873eV 和 0.9955eV 。众所周知,一维方势阱问题是量子力学最基本问题之一,量子阱结构在某种意义上是一维方势阱的实际例子。我们考虑到非对称分别限制层对一维方势阱的影响。经修正以后的理论计算结果如表 1 所示。表中 E_e 表示以导带底作零点时的电子能级; E_{1h} 和 E_{hh} 分别表示以价带顶作零点时的轻、重空穴能级; E_{e-1h} 和 E_{e-hh} 分别表示电子与轻、重空穴能级之间(满足 $\Delta n=0$ 选择定则)跃迁能量; ΔE_{1h-hh} 表示电子到轻空穴能级与电子到重空穴能级跃迁能量差。对照理论计算结果,显然,图 4(a)中的 A 峰和 B 峰分别表示子能

表 1 利用一维方势阱理论模型计算结果

n	E_e (meV)	E_{hh} (meV)	E_{1h} (meV)	E_{e-hh} (eV)	E_{e-1h} (eV)	ΔE_{1h-hh} (meV)
1	8	1	6	0.993	0.998	5
2	31	4	26	1.019	1.041	22
3	66	10	58	1.061	1.108	48



(a) 在低温 10K 条件下, 激发光功率密度为

0.77W/cm² 时的光致发光谱

(b) 在 10K 和 77K 温度下, 激发光功率密度为

6.5W/cm² 时的光致发光谱

图 4 1.35μm InGaAsP/InP 分别限制单量子阱结构外延片的光致发光谱

级 $n=1$ 的电子态与重空穴、轻空穴态之间的激子跃迁。这与 Yoichi Sasai 等人^[3]的测量结果(如图 4(a)右上角所示)是一致的。A 峰与 B 峰之间的间隔对应着 $n=1$ 的轻、重空穴两个子能级之间的差。实验测得这两个子能级之间距离为 8.3meV, 这比理论计算结果(如表 1 所示)略大。当我们把激发光功率密度逐渐地增大, 由于激光对电子的加热效应也随着加大, B 峰的强度逐渐地大于 A 峰的强度。当激发光功率密度增加到 6.5W/cm² 时, 导带中 $n=1$ 的电子态与轻空穴态之间的激子跃迁占主导地位, 如图 4(b)中 B 峰所示。随着样品温度的升高, 带边向长波方向发生了移动。当样品温度升至 77K 时, 我们仍能清楚地看到 A、B 两个激子光致发光峰的存在, 并且分别移至 A' 和 B' 处, 如图 4(b)所示。它们分别对应的能量为 0.972eV 和 0.981eV, 即向长波方向移动了 14.5meV, 这正好是在这温度变化范围内能隙的改变量。

在不同温度条件下测得 SQW91-30 和 SQW91-47 样品光致发光谱的半高宽度 ΔE 如表 2 所示。表中的光致发光谱宽实际上是两个激子峰迭加以后总的半高宽度, 如图 4 所示。

表 2 不同温度条件下, 分别限制量子阱结构外延片的光致发光谱宽

样 品	$\Delta E(10K)$	$\Delta E(77K)$	$\Delta E(210K)$
SQW91-30	29.5meV	36.8meV	43.3meV
SQW91-47	28.2meV	40.4meV	44meV

示。在 10K 温度条件下, SQW91-47 样品的单个激子峰的半高宽度约为 20meV, 这个结果与 Yoichi Sasai 等人测量样品 QW-11 的结果是相一致的, 但比 M. Kondo 等人^[7]用 LP-MOVPE 方法生长的 InGaAsP/InP SQW 的光致发光谱要宽。一般来说, 半导体量子阱结构外延片的光致发光谱的半高宽度与阱宽的均匀性, 亦即与量子阱结构界面上的粗糙程度有关; 同时还与外延层中合金组份分布的均匀性、异质结界面缺陷及杂质浓度有着密切的关系。作光致发光谱测试用的外延生长片, 虽然没有进行故意掺杂, 但是液相外延石墨

生长舟有一定的背景浓度,在低温下杂质与激子相互作用同样使谱线展宽^[8]. 随着样品温度的升高,有更多的载流子被激发,而自由载流子发射的是连续谱,所以温度升高测得的光致发光谱的半高宽度也增大.

我们在 SQW91-47 样品表面选择了三个不同的测量点,测得的光致发光谱基本是重复的. 这表明采用较高的生长温度(645℃),虽然加快了薄层生长速度,这给外延生长出具有量子尺寸效应的超薄层结构增添了一些困难,但是它能有效地促使外延层中合金组份均匀分布,而且能防止界面“岛状”结构的形成,从而获得均匀、平坦高质量的异质结界面.

四、结 论

在 645℃ 生长温度下,我们利用 LPE 生长技术已经成功地生长 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP /InP 分别限制量子阱结构. 经扫描电镜(SEM)和高压(1000kV)透射电镜(TEM)的观察分析,证明了量子阱结构外延生长片的层次分明且平直,阱宽为 160\AA ,在阱层的界面上存在着一层约为 30\AA 左右的过渡层. 在 10K 和 77K 温度下,测量了量子阱结构外延片的光致发光谱,清楚地观察到 $n=1$ 的子能级上的激子跃迁,而且随着光激发功率的变化, E_{e-hh} 和 E_{e-1h} 跃迁存在着明显的竞争效应. 实验表明 $1.35\mu\text{m}$ InGaAsP /InP 分别限制量子阱结构外延片的光致发光强度远远大于在同样条件下生长的体材料的光致发光强度. 这充分证明了用分别限制量子阱结构做成的半导体激光器可以获得高的量子效率、低的阈值电流和大的输出功率等特性.

本工作在样品测量过程中,得到戴远东教授,张丽珠副教授和张伯蕊工程师的大力支持和帮助. 北京有色冶金研究总院的孙贵如同志帮助我们做了样品横截面的 TEM 分析. 在这里我们向上述同志的大力协作表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- [1] K. Kelfing, K. Koehler and P. Zwicknagl. *Appl. phys. Lett.*, **48**(2), 157(1986).
- [2] Seiji Mukai, Masanobu Watanabe et al., *Japanese Journal of Applied physics*, **28**(10), L1725(1989).
- [3] Yoichi Sasai, Nobuyasu Hase and Takao Kajiwara. *Japanese Journal of Applied physics*, **24**(2), L137(1985).
- [4] H. Temkin, T. Tanbun-Ek et al., *Appl. Phys. Lett.*, **56**(13), 1222(1990).
- [5] 黄德修, 半导体光电子学, 第八章, 电子科技大学出版社, 1989.
- [6] Yoichi Sasai, Nobuyasu Hase et al., *J. Appl. Phys.*, **59**(1), 28(1986).
- [7] M. Kondo, S. Yamazaki et al., *J. Crystal Growth*, **93**, 376(1988).
- [8] J. Lee, E. S. Koteles et al., *Phys. Rev.*, **B33**, 5512(1985).

Study of 1.35 μm InGaAsP/InP Quantum Well Structure Grown by LPE

Xing Qijiang, Wang Shumin, Wang Ruopeng, Chen Weixi, Zhang Bei

Zhao Canggang, Dang Xiaozhong and Yu Lisheng

Department of Physics, Peking University, Beijing 100087

(Received 27 January 1992; revised manuscript received 27 August 1992)

Abstract

1.35 μm InGaAsP/InP separate confinement single quantum well (SQW) structures have been successfully grown by liquid-phase epitaxy (LPE) technique for the first time in our country. The SQW structures have been studied by the transmission electron microscope cross-section technique and photoluminescence (PL) at 10K and 77K. The well width and transition layer thickness are 160 Å and 30 Å, respectively. The strong free excitonic peaks assigned to the transition between the $n=1$ electron quantum level and the $n=1$ heavy-(light-) hole quantum level have been observed in the PL spectrum. The photon energy difference between the two photoluminescence peaks is about 8.3meV, and the full width at half maximum of the PL peak at 10K is 20meV.

PACC: 6855, 8115L, 7340L, 7865