

LP-MOCVD 生长伸张应变 InGaAs/InP 多量子阱的研究

刘宝林* 杨树人 陈佰军 刘式墉

(吉林大学电子工程系、集成光电子学国家重点实验室, 长春, 130023)

* (厦门大学物理系, 361005)

1994—06—01收稿, 1995—04—03收改稿

提要 首先从理论上研究了在应变情况下量子阱中能级的计算, 然后利用 LP-MOCVD 研究了 InGaAs/InP 组份的控制及生长条件, 最后生长伸张应变为 0.5% 的四个量子阱 InGaAs/InP 结构材料, 利用 PL 光谱测量得最小阱宽为 1.8 nm。

关键词: LP-MOCVD InGaAs/InP 伸张应变 量子阱

中图分类号: O471.4 TN304.054

The Study on Multiple Quantum Well of Tensile-Strained InGaAs/InP Grown by LP-MOCVD

Liu Baolin* Yang Shuren Chen Baijun Liu Shiyong

(Dept. of Electro. Engineering, Jilin Univ., Changchun, 130023)

* (Physic Dept. of Xiamen Univ., 361005)

Abstract: The energy levels of quantum well (QW) under differential strain have been calculated, the composition and growth rate of InGaAs matched with InP have been studied by Low Pressure Metallorganic Chemical Vapour Deposition (LP-MOCVD). Four-QW InGaAs/InP with 0.5% tensile strain has been grown. The narrowest well width is 1.8 nm by PL spectroscopy measurement.

Key Words: LP-MOCVD InGaAs/InP Tensile-strain QW

1 引言

由于量子效应引起半导体中原来简单的价带中重、轻空穴带分裂, 从而引起人们广泛的重视。AlGaAs/GaAs^[1]和 InGaAs/InP^[2]量子阱结构不仅使其器件性能明显改善, 而且不断研制出新的功能器件。

最近又发现应变效应能够进一步改变半导体中的能带结构, 利用量子阱区的压缩应变可使重、轻空穴的能级分裂比纯量子效应更大, 最高空穴子带有效质量进一步减小^[3]。因此, 在半导体光电器件方面的应用更引起人们的重视。虽然利用伸张应变可以实现重轻空穴能带反转,

但最高空穴子带在生长平面方向具有较重的有效质量,这似乎对改善器件的性能不利。因此,伸张应变的研究开始并不引起人们的重视,但是进一步分析发现^[4],由于此时最高空穴态为 $|3/2, \pm 1/2\rangle$ 态,它与导带作用具有较大的增益矩阵元,因此利用伸张应变效应仍然可以实现激光器低阈值^[5],并且利用它还可以实现更大输出功率,由于此时导带中电子与 $|3/2, \pm 1/2\rangle$ 态空穴作用,激射模不为传统结构中的 TE 模,而为 TM 模^[6]。

首先从理论上研究了应变量子阱中能级计算,在实验上利用 LP-MOCVD 技术研究 InGaAs 体材料组份和生长速率的控制,最后生长了伸张应变为 0.5% 的四个量子阱的伸张应变量子结构,并在 77 K 下利用 PL 光谱分析了它的结构。虽然国内对压缩应变量子阱效应已有不少的报道,但伸张应变的研究尚未见到。

2 应变量子阱的能级计算

在应变量子阱中,由于应变和量子阱的效应同时存在,能带和能级的计算分析比普通量子阱要复杂得多,根据 K·P 能带理论,如果不考虑应变对 Luttinger 参数的影响,应变和量子阱效应可以单独考虑。此时,双轴应变效应产生效果可以分解为纯单轴应变和纯静压应变的效果。纯静压应变只均匀地改变材料的性能,而单轴应变则改变晶体的对称性。当计算应变量子阱中的能级时,重、轻空穴在 Γ 点解偶,因此重、轻空穴的能级计算可以单独考虑。

在半导体中,如果外延层的晶格常数与衬底的晶格常数不相等时,只要外延层厚度小于其临界层厚度,这一失配使外延层晶体发生双轴应变,而不会引进位错,在生长平面方向应变为^[7]:

$$\epsilon_{//} = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_s - a_e}{a_e} \quad (1)$$

其中 a_s 为衬底的晶格常数, a_e 为外延层的晶格常数,由于泊松效应,在生长方向会产生一个相反的应变:

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{zz} = -2 \frac{\sigma}{1 - \sigma} \epsilon_{//} \quad (2)$$

σ 为泊松比,对于 InGaAs, σ 近似为 0.33^[6],因此纯静水压应变 ϵ_{vol} 和单轴应变 ϵ_{ax} 分别为:

$$\epsilon_{vol} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \epsilon_{//} \quad (3)$$

$$\epsilon_{ax} = \epsilon_{\perp} - \epsilon_{//} = -2\epsilon_{//} \quad (4)$$

纯静水压应变 ϵ_{vol} 只使材料禁带宽度改变 ΔE_g , 单轴应变 ϵ_{ax} 则改变晶体的对称性,使重、轻空穴能带在 Γ 点分裂,分别上移和下移 S 量。

$$\Delta E_g = a \cdot \epsilon_{vol} \quad (5)$$

$$S = -b \cdot \epsilon_{ax} \quad (6)$$

其中 a, b 分别为纯静压形变势和单轴形变势,都为负值,当 $a_e > a_s$ 时,外延层受双轴压缩应变,此时, $\epsilon_{//} < 0, \Delta E_g > 0, S > 0$, 因此,重空穴态在轻空穴之上。同样,当 $a_e < a_s$ 时,外延层受双轴伸张应变时, $\epsilon_{//} > 0, \Delta E_g < 0, S < 0$, 应变使轻空穴态高于重空穴态。

将应变哈密顿矩阵作为微扰加入 K·P 微扰理论的能带矩阵中,利用量子阱的边界条件就可以计算出应变量子阱的能带^[12]。对于计算量子阱的能级,由于它相当于计算能带 Γ 点的能量位置,根据 K·P 能带理论,在 Γ 点重、轻空穴解偶,也可以用传统的方势阱方法计算量子阱能级与阱宽的关系^[9]:

$$\tan[(2M_w^* E / \hbar^2)^{1/2} \cdot w/2] = [M_b^* (\Delta E - E) / (M_w^* E)]^{1/2} \quad (7)$$

其中 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h 为普朗克常数, M_w^* 和 M_b^* 为量子阱和势垒区载流子的有效质量, ΔE 为势垒高度, 满足方程 (7) 的能量 E 就为量子化能级, 它显然为阱宽 W 的函数, 对于匹配量子阱量子化能级可以直接由此式求得^[13]。对于应变量子阱价带空穴的势垒高度应作如下修正, 对于重、轻空穴势垒高度由 $0.55(E_{g_b} - E_{g_w})$ 分别变为 $0.55(E_{g_b} - E_{g_w}) - \Delta E_g + S$ 和 $0.55(E_{g_b} - E_{g_w}) - \Delta E_g - S$ 两个不同的值, E_{g_b} 和 E_{g_w} 分别为垒和阱体材料的禁带宽度, 0.55 为 InGaAs/InP 异质结的能带断续系数, $\langle 100 \rangle$ 方向有效质量与 Luttinger 参数 γ_1, γ_2 和 γ_3 有如下关系: $m_{bh}^* = m_e/(\gamma_1 - \gamma)$, $m_{lh}^* = m_e/(\gamma_1 + \gamma_3)$, m_e 为自由空间电子有效质量, 把这些改变后的关系代入 (7) 式, 很容易求出应变量子阱导带电子和价带空穴的第一量子化能级 ΔE_c 和 ΔE_v , 因此, 应变量子阱的第一个电子能级到高空穴能级的跃迁能量为:

$$h\nu = E_g + \Delta E_g - |S| + \Delta E_c + \Delta E_v \quad (8)$$

图1给出了三个不同应变大小和无应变下 InGaAs/InP 应变量子阱在 300 K 下波长与阱宽的关系, 在应变下 a 和 b 等值采用表(1)给出的 InAs 和 GaAs 的参数内插求得。

表1 InAs 和 GaAs 的材料参数^[11]

| | a/eV | b/eV | γ_1 | γ_2 | γ_3 | $m_c^* (m_e)$ |
|------|--------|--------|------------|------------|------------|---------------|
| GaAs | - 8.23 | - 2.0 | 6.59 | 2.25 | 2.86 | 0.069 |
| InAs | - 6.0 | - 1.8 | 19.67 | 8.37 | 9.29 | 0.023 |

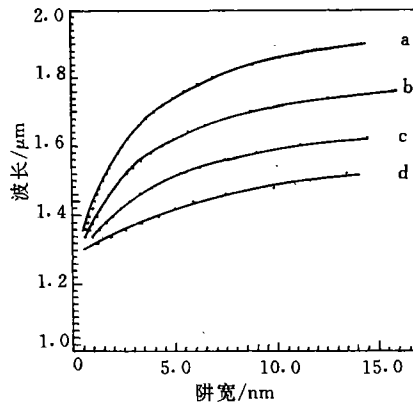


图1 InGaAs/InP 应变量子阱 300 K 光荧光峰值波长位置与阱宽的关系。(a)应变 $\epsilon_{//}$ 为 -1%; (b) $\epsilon_{//} = -0.5\%$; (c) $\epsilon_{//} = 0$; (d) $\epsilon_{//} = 0.5\%$ 伸张应变

3 样品制备

样品采用从法国 ASM 公司进口的 OMR-12 型 LP-MOCVD 设备生长, V 族源采用进口的纯 PH_3 和 AsH_3 , III 族 Ga 源为进口的 TMGa, In 源为南京大学提供的 TMIIn, TMIIn 源温为 $30.0\text{ }^\circ\text{C}$, TMGa 为 $-11\text{ }^\circ\text{C}$, 反应室压力为 10 kPa , 生长时衬底温度为 $625\text{ }^\circ\text{C}$, 系统总 H_2 流量为 8 L/min , 在整个外延过程中, TMIIn 的流量为 $10\text{ }\mu\text{ml/min}$, 调整 TMGa 的流量来调整 InGaAs 中 Ga 的含量。生长 InGaAs 的 V / III 比为 $60\sim 70$, InP 的 V / III 比为 $250\sim 300$ 。

体材料 InGaAs 中的 Ga 含量由 (004) 面 X 光双晶衍射峰的峰值位置来确定, 其生长厚度不应小于 $1\text{ }\mu\text{m}$, 本研究生长的为 $1.3\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$, 如果生长厚度太薄, 测量要用复杂的 X 光方法才能准确确定 Ga 的含量。如果太厚则浪费源。InGaAs 和 InP 的生长厚度用显结并在高倍显微镜和扫描电镜的方法测得, 用来测量的样品表面须光亮。量子阱的生长采用 PH_3 保护 InP 和 AsH_3 保护 InGaAs, 其切换时间采用本 LP-MOCVD 设备的极限时间: $2''$, PH_3 换 AsH_3 也用 $2''$ 。

4 实验结果与讨论

InGaAs 体材料的组份及生长速率对于 InGaAs/InP 应变量子阱, InGaAs 的组份及生长速率控制是至关重要的。它能准确控制应变大小和量子阱的阱宽和垒宽。图2给出了 X 光双晶衍射测量得到的 InGaAs 中 Ga 含量与 TMGa 流量的关系。随着 TMGa 流量增加, InGaAs 中

Ga 的含量增加,并且在与 InP 匹配点附近成线性关系。

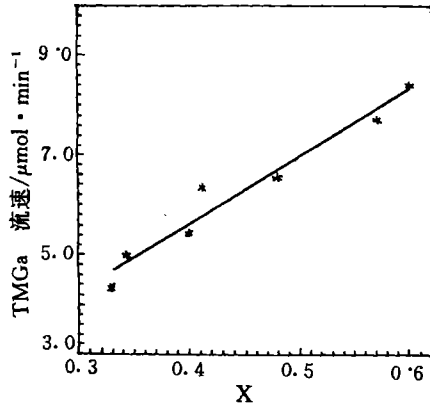


图2 TMIn = 10 μmol/min 时利用 TMGa, TMIn 和 AsH₃ LP-MOCVD 生长 In_{1-x}Ga_xAs 时, x 与 TMGa 流速的关系

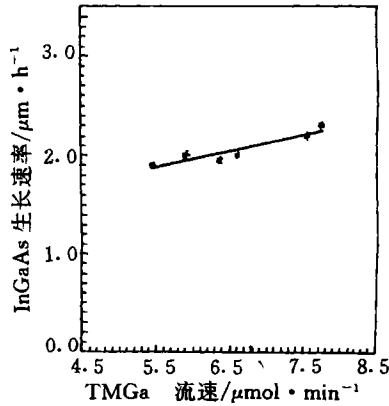


图3 TMIn = 10 μmol/min 时, InGaAs 体材料生长速率与 TMGa 流量的关系

图3是 InGaAs 的生长速率与 TMGa 流量的关系,由这一关系可以看出,在与 InP 匹配点附近,其典型生长速率为~2 μm/h,它相当于每秒生长两个单原子层。另外,由这一拟合关系外推出 TMGa 流量为零,即生长 InAs 时生长速率为0.97 μm/h,与 InP 的生长速率一致,这与早期报道的利用 MOCVD 生长 III-V 族材料,在 V/III 适当范围内,其生长速率与 III 族源流量有关,而与 V 族源流量无关的结论一致。

0.5% 的伸张应变量子阱生长用衬底片是河北半导体研究所提供的高质量(100)±10' N 型高导 InP 片。由于采用失配外延,生长多量子阱时,没有生长参考层,在 InP 衬底上生长一层非掺杂 InP 缓冲层,厚度为0.5~0.8 μm, InP 势垒厚度为20.0 nm。根据理论计算,量子阱阱宽在10.0 nm 以下,第一能级的波函数在势垒中的穿透深度小于5.0 nm,使得用 PL 法测量能级能真实反应单量子阱的效应。所以20.0 nm 的势垒宽度足以阻挡住多量子阱中阱与阱之间波函数的相互作用。量子阱结构如图4所示,其生长时间依次为:18", 10", 7", 3"。应变为0.5%伸张应变,即 In_{1-x}Ga_xAs 中, x 为0.54,因此调整的流速为7.4 μmol/min,此时生长速率2.2 μm/h,它们对应宽度为11.0、6.1、4.2 和1.8 nm。由于选择应变大小为0.5%,此时临界层厚度在30.0 nm 以上,选择这样的结构可以确保整个结构无弛豫发生。

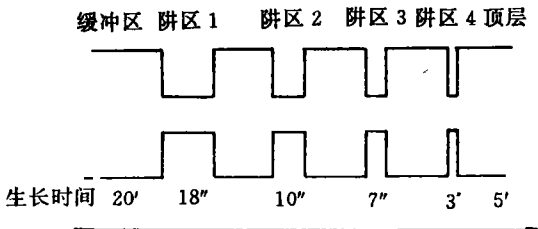


图4 伸张应变为0.5%的四个 InGaAs/InP 量子阱的结构

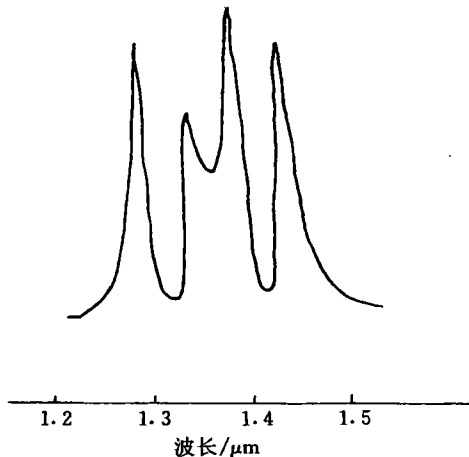


图5 77 K 时的 PL 光谱

77 K 时 PL 光谱如图5所示。图中出现四个量子阱的峰,从中可以明显看出量子效应引起能级的移动,77 K 时能级位置分别为1.43、1.380和1.283 μm ,第一和第四个量子阱的全半高峰宽(FWHM)分别为17.6 meV和17.9 meV,四个量子阱对应室温300 K 波长为:1.496、1.396和1.340 μm ,它们对应阱宽分别为11.6、5.8、4.2和1.8 nm,与生长速率计算的阱宽基本一致。

5 结 论

(1) 利用 K·P 法计算了不同应变下 InGaAs/InP 量子阱的300 K PL 光荧光峰值波长位置与阱宽的关系。

(2) 利用 LP-MOCVD 研究了 InGaAs 体材料的组份控制和生长速率随 TMGa 流量的关系,得到典型 InGaAs 的生长速率为2 $\mu\text{m}/\text{h}$ 。

(3) 生长了伸张应变为0.5%四个不同阱宽的 InGaAs/InP 应变量子阱,并在77 K 下测量了 PL 光谱,分析发现其最小阱宽为1.8 nm,半峰宽为17 meV

参 考 文 献

- 1 Wang C A. *IEEE J Quantum Electronics*, 1991, 27:88
- 2 Tanbun-EK T. *Appl Phys Lett*, 1989, 55:819
- 3 Adams A R. *Electron Lett*, 1986, 22:249
- 4 O'Reilly E P. *Electron Lett*, 1991, 27:1 417
- 5 Thijs P J A. *IEEE Quantum Electron*, 1991, 27: 1 426
- 6 Sato K. *12th IEEE International Semiconductor Laser Conference*, in Seitzercand, 1990, D-4:48
- 7 O'Reilly E P. *Semicond Sci Technol*, 1989, 4:121
- 8 Madelung O. *Landolt-Bornstein, new series Group III*, 1982:17
- 9 席夫 L I. 《量子力学》,北京:人民教育出版社, 1981:40
- 10 Kuech M T F. *Material Science Reports*, 1987, 2:1
- 11 Yablonoitch E. *J of Lightwave Technology*, 1988, 6:1 292
- 12 刘宝林,刘式壙. *光子学报*, 1993, 22(2):114-120
- 13 Wang T Y. *J Appl Phys*, 1988, 63:2 674



刘宝林(Liu Baolin) 男,1963年5月生,1984年中山大学物理系本科毕业,1987年河北半导体研究所硕士毕业,1993年吉林大学电子工程系博士毕业,现在厦门大学物理系工作,从事 III-V 族半导体光电子器件的研究,主要用 LPE、MOCVD 等方法研究 InGaAs(P)/InP 材料、探测器、应变量子阱激光器。



杨树人(Yang Shuren) 1939年4月28生,辽宁沈阳人,吉林大学电子工程系教授,长期从事半导体材料和器件的教学和研究工作。



刘式壙(Liu Shiyong) 1935年11月21日生,辽宁锦西人,吉林大学教授、博士生导师,长期从事半导体光电子学方面的研究工作。现任集成光电子学国家重点联合实验室主任。