

# MOCVD 生长 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱子带间红外吸收特性\*

程兴奎

(山东大学光电材料与器件研究所, 山东, 济南, 250100)

黄柏标 徐现刚 刘士文 任红文 蒋民华

(山东大学晶体材料研究所, 山东, 济南, 250100)

**摘要** 对 MOCVD 生长的 GaAs(40 Å)/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As(300 Å) 多量子阱结构观察到阱内电子从基态到第一激发态跃迁引起的红外吸收. 用 Bruker 红外光谱仪测量, 发现了一个峰值在 986 cm<sup>-1</sup> (10.1 μm) 带宽为 237 cm<sup>-1</sup> (9~11.5 μm) 的强吸收峰, 该峰位置与阱内电子从基态到第一激发态跃迁所计算的吸收峰位置基本一致.

**关键词** GaAs/AlGaAs, 多量子阱, 子带, 红外吸收.

## 引言

1989 年, 美国贝尔实验室首次报道由 MBE 技术制备出 8~12 μm GaAs 量子阱红外探测器<sup>[1]</sup>. 由 MBE 技术制备量子阱器件虽然有许多优点, 但 MBE 设备复杂, 成本昂贵, 实验费用相当高. 迅速发展起来的 MOCVD 技术在实现低成本和大规模生产上较 MBE 有明显优势, 因此, 研究用 MOCVD 制备 GaAs 多量子阱红外探测器就更加有意义. 本文报道由 MOCVD 制备的 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱结构及测得的红外吸收特性.

## 1 样品制备

用 Vp-50Rp 型 MOCVD 设备, 在掺铈的半绝缘 GaAs 衬底上首先生长一层 1 μm 厚的掺 Si GaAs ( $n \sim 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ), 然后生长 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 多量子阱结构, GaAs 阱层厚 40 Å, 掺 Si 浓度为  $n \sim 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 势垒层厚 300 Å, Al 组份  $x = 0.22$ , 共 50 个周期, 最后生长一层掺 Si ( $n \sim 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) GaAs, 厚为 0.5 μm.

\* 国家自然科学基金资助项目

本文 1992 年 5 月 13 日收到, 修改稿 1992 年 12 月 22 日收到

外延生长温度为  $650^{\circ}\text{C}$ ，阱层 GaAs 生长速率为  $4\text{ \AA/s}$ ，势垒层  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  生长速率为  $10\text{ \AA/s}$ 。为了进行红外测量，样品解理成矩形，其相对的两个侧面被抛光成相互平行、且与样品表面成  $45^{\circ}$  角。在红外吸收测量中，光束从一个被抛光的侧面垂直入射，穿过样品，经多次反射，从另一个侧面透射出去，以增强样品对光的吸收。

## 2 测试结果与分析讨论

对 MOCVD 制备的  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  多量子阱结构的样品由透射电镜获得其结构的纵剖面显微照片示于图 1，由图可以看到规则排列的具有高对比度的亮条与暗条，其中亮条是  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  层，暗条是 GaAs 层，亮条与暗条之间边界清晰，这表明异质界面是突变的。此外，图中几乎没有发现每层的厚度涨落（即形成岛状结构），这说明各层厚度分布比较均匀。

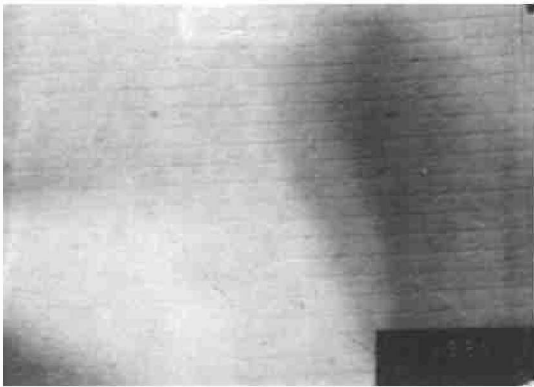


图 1  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  多量子阱结构的透射电镜图

Fig. 1 TEM image of a  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  multiple quantum well structure

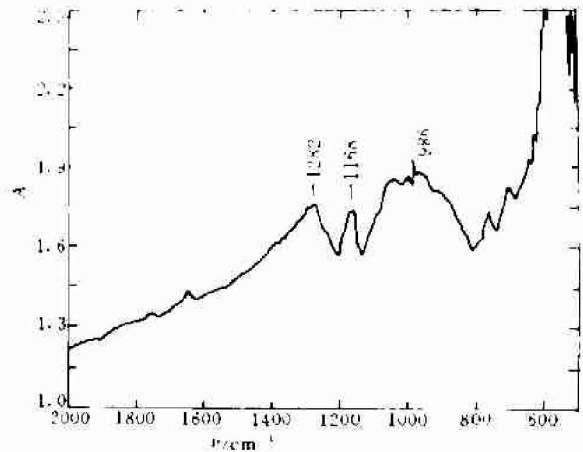


图 2  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  多量子阱结构实测吸收谱

Fig. 2 Measured absorption spectrum of multiple quantum well structure

图 2 是由 Bruker 傅里叶变换光谱仪在室温下对样品测得的红外吸收曲线，可以看到一个强的吸收峰处于  $\nu_0 = 986\text{ cm}^{-1}$  ( $\lambda = 10.1\text{ }\mu\text{m}$ ) 附近，响应带宽为  $\Delta\nu = 237\text{ cm}^{-1}$  ( $\Delta\lambda = 11.5 \sim 9\text{ }\mu\text{m}$ )， $\Delta\nu/\nu_0 = 24\%$ ，峰吸收度  $A = -\log T$  为 0.3 ( $T$  是透过率)，由此算得透过率  $T = 48\%$ 。

当 Al 组份  $x = 0.22$  时，GaAs 和  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  两种材料的禁带宽度之差  $\Delta E_g = 0.2743\text{ eV}$ ，取  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$  界面处导带底能量差  $\Delta E_c = 0.65\Delta E_g$ <sup>[2]</sup>，则导带内所形成的量子阱深度  $V_B = 0.178\text{ eV}$ 。对宽度为  $L_W$ 、深为  $V_B$  的量子阱，由于电子的隧穿效应，该量子阱对电子的实际限制范围为  $L' = L_W + (2M_n^*\hbar^2/m_n^{*2}V_B)^{1/2}$ ，其中  $m_n^*$  是电子在 GaAs 阱层中的有效质量， $M_n^*$  是电子在  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  势垒层中有效质量<sup>[3]</sup>。取  $m_n^* = 0.067m_0$ ， $M_n^* = (0.067 + 0.083x)m_0$ <sup>[4]</sup>，对  $x = 0.22$  可以计算得到  $L' - L_W = 40\text{ \AA}$ 。

我们将量子阱中电子的基态能近似表示为

$$E_1 = \frac{\hbar^2}{2m_n^*} \left( \frac{\pi}{L'} \right)^2, \quad (1)$$

若阱宽  $L_W = 40 \text{ \AA}$ , 组份  $x = 0.22$ , 由式 (1) 可算得基态能  $E_1 = 87 \text{ meV}$ . 当阱中电子浓度较大时, 由于电子的交换相互作用, 使得量子阱中电子基态能级下移, 室温下  $E_1$  下移约  $20 \text{ meV}$ <sup>[5]</sup>, 即  $E_1$  在 GaAs 导带底以上  $67 \text{ meV}$ .

根据量子阱中电子费密能级  $E_F = \frac{\hbar^2}{2m_n^*} K_F^2$ , 其中  $K_F = \sqrt{2\pi\sigma}$ ,  $\sigma = n_0 L_W$  是电子薄层密度,  $n_0$  是体电子密度, 若  $L_W = 40 \text{ \AA}$ ,  $n_0 = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 可求得  $E_F = 28 \text{ meV}$ , 即  $E_F$  在基态能级  $E_1$  以上  $28 \text{ meV}$  处, 如图 3 所示.

设量子阱中电子服从费密分布, 室温下基态能级以上费密能级以下各能态几乎都占有电子, 我们认为处于  $986 \text{ cm}^{-1}$  的强吸收峰是费密能级附近的电子跃迁到第一激发态形成的, 由此可估计第一激发态应在费密能级  $E_F$  以上  $122 \text{ meV}$  处, 即位于势垒顶以上  $39 \text{ meV}$ . 由边界条件可导出计算量子阱中电子的子能级公式<sup>[6]</sup>

$$-\cot \left( \frac{L_W}{\hbar} \sqrt{\frac{m_n^* E_n}{2}} \right) = \sqrt{\left( \frac{V_B}{E_n} - 1 \right) \frac{m_n^*}{M_n^*}}. \quad (n = 2, 4, 6, \dots) \quad (2)$$

对 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 量子阱, 若  $L_W = 40 \text{ \AA}$ ,  $x = 0.22$ , 可计算得第一激发态 ( $n=2$ ) 能量为  $213 \text{ meV}$ , 即在势垒顶以上  $35 \text{ meV}$ , 此结果和实验估计值基本一致. 这表明  $986 \text{ cm}^{-1}$  强吸收峰就是处于费密能级附近的电子向第一激发态跃迁形成的, 而通常人们把这种跃迁称为电子由基态向第一激发态的跃迁. 其他几个弱峰将另文讨论.

### 3 结论

**3.1** 对 MOCVD 制备的 GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As 多量子阱结构进行的红外吸收测量发现, 存在一个  $986 \text{ cm}^{-1}$  ( $10.1 \text{ \mu m}$ ) 强吸收峰, 这是阱中电子从基态到第一激发态的跃迁形成的.

**3.2** 阱宽  $L_W = 40 \text{ \AA}$ 、阱层掺杂浓度  $n_0 \approx 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的 GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As 量子阱, 其电子的基态能级处于 GaAs 导带底以上  $67 \text{ meV}$ , 第一激发态能量位于势垒顶以上约  $35 \text{ meV}$ .

**3.3** 我们观察到的 MOCVD 制备的 GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As 多量子阱吸收峰值为  $10.1 \text{ \mu m}$  ( $986 \text{ cm}^{-1}$ )、响应带宽为  $9 \sim 11.5 \text{ \mu m}$  的强吸收表明, 可以用 MOCVD 技术制备  $8 \sim 14 \text{ \mu m}$  范围的 GaAs 多量子阱红外探测器, 这对实现低成本和大规模生产具有重要意义.

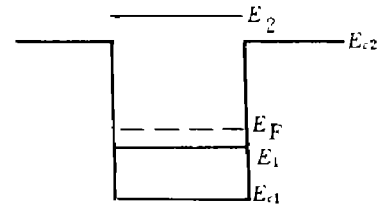


图 3 GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As 量子阱的能带示意图

Fig. 3 Schematic band diagram of GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As quantum well

## 参考文献

- 1 Levine BF *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(26):2704
- 2 Levine BF *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(4):383
- 3 Choe JW *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(17):1679
- 4 Sada Adachi. *J. Appl. Phys.*, 1985, **58**(3):R1-29
- 5 Manasreh M O. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(17):1790
- 6 滕达等. *半导体学报*, 1990, **11**(2):97

INTERSUBBAND INFRARED ABSORPTION IN GaAs/AlGaAs  
MULTIQUANTUM WELL GROWN BY MOCVD\*

Cheng Xingkui

(*Institute of Optoelectronic Materials and Devices, Shandong University,  
Jinan, Shandong 250100, China*)

Huang Bobiao Xu Xiangang Liu Shiwen  
Ren Hongwen Jiang Minhua

(*Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China*)

**Abstract** Infrared absorption due to the electronic transition between the confined ground state and the first excited state in a GaAs (40 Å)/AlGaAs (300 Å) multi-quantum well structure grown by MOCVD was observed. The infrared absorption spectrum measured at room temperature shows a strong absorption peak at  $986\text{ cm}^{-1}$  ( $\lambda = 10.1\ \mu\text{m}$ ), with absorption bandwidth (full width at half maximum) of about  $237\text{ cm}^{-1}$  ( $9\sim 11.5\ \mu\text{m}$ ). The position of the infrared absorption peak obtained from the measurement is basically in agreement with the calculated result on the basis of the electronic transition from the confined ground state to the first excited state in the GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As quantum well.

**Key words** GaAs/AlGaAs, quantum well, subband, infrared absorption.

---

\*The project supported by the National Natural Science Foundation of China