

⑤ 339-343

# GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的电子干涉与红外吸收\*

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<sup>▽</sup> 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)

TN304.2  
O471.1

**摘要** 在室温下测量了 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的红外吸收, 观察到在 706、770、1046、1282 和 1653 $\text{cm}^{-1}$  处的几个吸收峰. 认为这些吸收峰与处于势垒以上电子干涉有关, 理论计算的吸收峰位置与实验结果很一致.

**关键词** 多量子阱结构, 电子干涉, 红外吸收.

砷化镓 铝镓砷

## 引言

1929 年 Newmann 等提出<sup>[1]</sup>, 一些振荡型势垒结构能够支持能量在势垒上方的束缚态, 这些束缚态就是在能量连续区的空间限制态. 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构, 在红外吸收测量中, 我们观察到多峰吸收并认为这是由于势垒上方的分立能态引起, 本文以电子干涉的观点对实验结果进行了分析讨论.

## 1 样品制备及测量结果

用 Vp-50Rp 型 MOCVD 设备, 在半绝缘 GaAs 衬底上首先生长一层厚 1 $\mu\text{m}$  掺 Si ( $n \approx 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 的 GaAs, 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 ( $n \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 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, 最后生长一层厚为 0.5 $\mu\text{m}$  掺 Si ( $n \approx 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) 的 GaAs. 生长温度 650 $^{\circ}\text{C}$ , GaAs 阱层生长速率为 4 Å/s, Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 势垒层生长速率为 10 Å/s. 为满足量子阱结构对垂直于阱层平面方向偏振吸收的要求, 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, 以增强样品对光的吸收.

图 1 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, 可以看出存在几个分立的强度不同的吸收峰, 其峰值位置分别为 706、770、1046、1168、1282 和 1653 $\text{cm}^{-1}$ .

\* 国家自然科学基金资助项目(编号 69076436)  
稿件收到日期 1996-09-12, 修改稿收到日期 1997-07-02

## 2 分析讨论

设  $Z$  方向与量子阱层平面垂直, 则多量子阱结构的势分布如图 2,  $L_w$  和  $L_b$  分别是量子阱宽和势垒宽,  $U_0$  是势垒高度, 令 GaAs 导带底电子势能为零, 则处于 GaAs 阱层中能量为  $E$  的电子, 其动能  $E_k = E = \frac{\hbar^2 K_w^2}{2m_{nw}^*}$ , 式中  $m_{nw}^*$  和  $K_w$  分别是电子在 GaAs 阱层中的有效质量及波矢. 处于 AlGaAs 势垒层中能量为  $E$  的电子, 若  $E > U_0$ , 则动能  $E_k = E - U_0 = \frac{\hbar^2 K_b^2}{2m_{nb}^*}$ ,  $m_{nb}^*$  和  $K_b$  是电子在势垒层中的有效质量和波矢. 处于势垒以上的电子, 沿  $Z$  方向在多量子阱结构中运动时, 将被势垒反射. 由量子力学理论可计算得, 单个势垒对电子的反射系数为

$$R = \frac{1}{1 + 4K_w^2 K_b^2 / (K_w^2 - K_b^2) \sin^2 K_b L_b} \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 如果

$$K_b \cdot L_b = n\pi, \quad n=1, 2, 3, \quad (2)$$

则势垒对电子的反射系数为最小值, 即  $R=0$  (若  $n=0$ , 则  $L_b=0$  或  $K_b=0$ , 对所讨论的问题无意义); 如果

$$K_b L_b = (n + \frac{1}{2})\pi, \quad n=0, 1, 2, 3 \quad (3)$$

则势垒对电子的反射系数达最大值.

我们也可以从电子干涉的观点出发导出上述结果. 当电子波沿  $Z$  方向在多量子阱结构中传播时, 它受到各势垒与量子阱界面的反射, 图 2 示出不同势垒的界面 A、A\*、B、B\*、C、C\*……等, 同一势垒两个不同界面反射的两束电子波的波程差为  $\Delta = 2L_b + \lambda_b/2$ , 式中  $\lambda_b/2$  项是由于沿  $Z$  方向传播的电子波在界面 A\*、B\*、C\*……反射时的半波损失,  $\lambda_b$  是电子波在势垒层中传播的波长. 同样, 电子波沿  $-Z$  方向传播时, 在界面 A、B、C……反射也存在半波损失. 据波干涉理论, 当波程差等于半波长的奇数倍时, 即

$$2L_b + \frac{\lambda_b}{2} = (2n+1) \frac{\lambda_b}{2}, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

则来自同一势垒两个不同界面反射的两束电子波的干涉强度为极小, 即反射系数为极小, 当波程差等于半波长的偶数倍时, 即

$$2L_b + \frac{\lambda_b}{2} = 2(n+1) \frac{\lambda_b}{2}, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

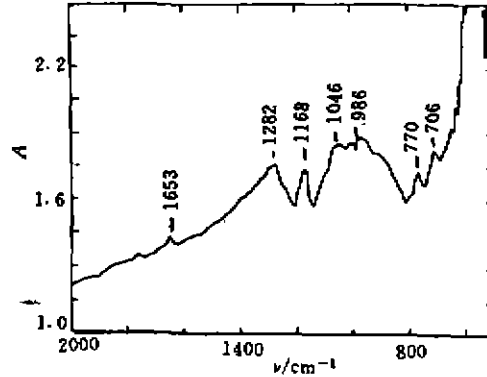


图 1 测量得到的 GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As 多量子阱结构的吸收谱

Fig. 1 Measured absorption spectrum of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiquantum well structure

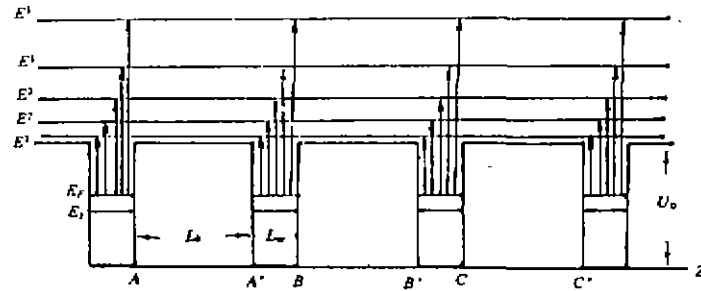


图 2 多量子阱结构的势分布及量子阱中基态电子向势垒以上弱干涉非定域态能级  $E^n$  的跃迁

Fig. 2 Schematic illustration of the potential distribution and transition of the ground state electron in quantum well to weak interference non-localized states  $E^n$  above barrier for MQW structure

由同一势垒两个不同界面反射的两束电子波的干涉强度为极大值,即反射系数达到极大.令  $K_b = \frac{2\pi}{\lambda_b}$ ,与电子有效质量有关,故  $K_b$  中含有有效质量.将  $K_b$  代入式(4)和(5),化简后得式(2),(3).这表明,势垒对电子反射系数的大小,实际上是电子波被同一势垒的两个界面反射后发生干涉强弱的结果.对于满足式(2)的  $K_b$  态,处于该态的电子可沿  $Z$ (或 $-Z$ )方向在多量子阱结构中运动,我们称这种态为弱干涉非定域态,对于满足式(3)的  $K_b$  态,处于该态的电子受势垒的反射系数极大,基本定域在 GaAs 阱层中,难以沿  $Z$ (或 $-Z$ )方向在多量子阱结构中运动,我们称这种态为强干涉定域态,弱干涉非定域态在阱区和势垒区的电子波函数是扩展的,强干涉定域态在阱区及势垒区的电子波函数也是扩展的,但在阱区波函数的幅值大,即电子存在几率大,在势垒区波函数的幅值小,即电子存在几率小.在势垒以上,弱干涉非定域态和强干涉定域态随能量增加而交替出现.将  $K_b = [\frac{2m_{nb}^*}{\hbar^2}(E-U_0)]^{1/2}$  代入式(2),得

$$E-U_0 = \frac{\hbar^2}{2m_{nb}^*} \left(\frac{n\pi}{L_b}\right)^2, \quad n=1,2,3,\dots \quad (6)$$

由于  $m_{nb}^* = (0.067 + 0.083X)m_0$ ,若  $x=0.22$ ,取  $L_b=300 \text{ \AA}$  代入式(6),得

$$E-U_0 = 4.9n^2 \text{ meV}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (7)$$

当  $n$  取 1,2,3,4,5 时,由式(7)计算出的  $E^n-U_0$  值列于表 1.

当 Al 组份  $x=0.22$  时,GaAs 与  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的禁带宽度差  $\Delta E_g = 0.2743 \text{ eV}$ ,取 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  界面处导带底能量差  $\Delta E_c = 0.65\Delta E_g^{[2]}$ ,则导带内形成的量子阱深  $U_0 = 0.178 \text{ eV}$ ,由

$$\text{tg} \frac{L_w}{2} \sqrt{\frac{2m_{nw}^* E_n}{\hbar^2}} = \sqrt{\frac{m_{nb}^*}{m_{nw}^*} \left(\frac{U_0}{E_n} - 1\right)}, \quad n=1,3,5, \quad (8)$$

可以算得: $L_w=40 \text{ \AA}$  时,基态能量  $E_1=87 \text{ meV}$ ,若阱中电子浓度较大,由于电子交换相互作用,使得基态能级  $E_1$  向下移动,室温下  $E_1$  下移约  $20 \text{ meV}^{[3]}$ ,即  $E_1$  在 GaAs 导带底以上  $67 \text{ meV}$ .

在量子阱中电子的费密能级  $E_F = \frac{\hbar^2 K_F^2}{2m^* n_w}$ , 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. 如果  $n_0 = 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ,  $L_w = 40 \text{\AA}$ , 可以算得  $E_F = 28 \text{meV}$ , 即费密能级  $E_F$  在基态能级  $E_1$  以上  $28 \text{meV}$  处, 因此  $U_0 - E_F = 83 \text{meV}$ . 由于  $E^n - E_F = (E^n - U_0) + (U_0 - E_F)$ , 利用式(7)对不同的  $n$  值求出  $E^n - U_0$ , 相应的  $E^n - E_F$  也随即求出, 其结果也列于表 1.

表 1 对 GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As 多量子阱结构计算的和测量的吸收峰位置的比较  
Table 1 The comparison between calculated and measured absorption peak position for GaAs/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As MQW structure

$n$	$E^n - U_0 (\text{meV})$	$E^n - E_F (\text{meV})$	$\nu_p (\text{cm}^{-1})$	$E_p (\text{meV})$
1	4.9	87.9	706	88
2	19.6	102.6	770	96
3	44.1	127.1	1046	130
4	78.4	161.4	1282	159
5	122.5	205.5	1653	205

表 1 还给出了由实验获得的以波数为单位的几个吸收峰的位置  $\nu_p (\text{cm}^{-1})$  及利用  $E_p = h \cdot c \nu_p$  求得的以能量 (meV) 为单位的吸收峰的位置.

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据电子. 我们认为, 当存在光激发时, 处于  $E_F$  附近的电子吸收一定能量的光子可跃迁到势垒以上弱干涉非定域态上, 但不能跃迁到强干涉定域态上, 如图 2 所示. 据此观点计算出的几个吸收峰的位置与实验观测到的结果符合得很好. 这表明: 对 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构, 在红外吸收中测到的多个吸收峰是由于电子干涉所引起.

应当指出, 弱干涉非定域态和强干涉定域态不是单一电子能态, 而是具有一定能量范围的能带, 非定域能带的中心能量对应于电子干涉极小值, 定域能带的中心能量对应于电子干涉的极大值, 非定域能带和定域能带在势垒以上统称为微带, 二者随能量增大交替出现.

值得注意的是, 由电子干涉引起的处于  $\nu_p = 1046 \text{cm}^{-1}$  的吸收峰, 叠加在一个宽的、峰位置大约在  $986 \text{cm}^{-1}$  的吸收带上, 该吸收带的位置由量子阱宽和阱深等参数决定, 但与势垒宽度  $L_0$  无关, 即与电子干涉无关引起.

$1168 \text{cm}^{-1}$  的吸收峰可能是由于 Si-C 键的振动吸收引起.

### 3 结论

(1) 在 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构中, 由于电子干涉, 使势垒以上的能态形成弱干涉非定域态和强干涉定域态构成的微带. 随能量增大, 两种微带交替出现. 处于非定域微带中的电子, 可在多量子阱结构中运动, 而处于定域微带中的电子, 基本限制于 GaAs 阱层中, 难以在整个多量子阱结构中运动.

(2) 当存在光激发时, 量子阱中束缚态上的电子可跃迁到弱干涉非定域态上, 但不能跃迁到强干涉定域态上, 因而形成的吸收谱不是一个很宽的吸收带, 而是出现多个分立的吸收峰. 由此观点出发, 在理论上计算出一些吸收峰的位置, 实验观察结果与理论值符合得很好.

## REFERENCES

- 1 Newmann J V, Wigner E. *Z. Phys.* ,1929,**30**:465
- 2 Dugan G, Ralph H I, Moore K. *Phys. Rev. B*,1985,**32**:8395
- 3 Manasreh M O, Szmulowicz F, Fischer D W, *et al. Appl. Phys. Lett.* ,1990,**57**(17):1790

## ELECTRON INTERFERENCE AND INFRARED ABSORPTION IN GaAs/AlGaAs MULTIQUANTUM WELL STRUCTURE \*

CHENG Xing-Kui

*(Institute of Optoelectronic Materials and Devices, Shandong University, Jinan, Shandong 25100, China)*

HUANG Bo-Biao XU Xian-Gang LIU Shi-Wen REN Hong-Wen JIANG Mi-Hua

*(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 150100, China)*

**Abstract** At room temperature, infrared absorption for GaAs/AlGaAs multiquantum well structure was measured and absorption peaks at 70, 770, 1046, 1282 and 1653  $\text{cm}^{-1}$  were observed. It was believed that the above absorption peaks the related to interference of electrons above the barrier. The calculated positions of absorption peaks are in good agreement with the experimental results.

**Key words** multiquantum well structure, electron interference, infrared absorption.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China  
Received 1996-09-12, revised 1997-07-02