

GaAs/ AlGaAs 多量子阱结构中的电子干涉

程兴奎¹, 黄柏标², 徐现刚², 任红文², 刘士文², 蒋民华²

(1. 山东大学光电材料与器件研究所, 济南 250100; 2. 山东大学晶体材料所, 济南 250100)

摘 要: 由电子波干涉的观点出发, 理论分析指出: 多量子阱结构势垒以上的电子存在一些分立的弱干涉非定域态. 通过红外光激发, 量子阱中基态电子可以跃迁到这些态上形成一些吸收峰. 理论计算出的吸收峰位置与实验测量到的结果相当一致, 并且理论估计的吸收峰强弱也与实验结果一致.

关键词: GaAs; 多量子阱; 电子干涉

中图分类号: TN204 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 05-0692-03

Interference of Electron in GaAs/ AlGaAs Multiquantum Well Structure

CHENG Xing-kui¹, HUANG Bo-biao², XU Xian-gang², REN Hong-wen², LIU Shi-wen², JIANG Min-hua²

(1. Institute of Optoelectronic Materials and Devices, Shandong University, Jinan 250100, China;

2. Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

Abstract: On the basis of theory of electron interference, it is pointed out that there are a series of separate weak interference non-localized state above barrier for multiquantum well (MQW) structure. When photoexcitation occurs, the electrons on ground state in quantum well can be excited to the weak interference non-localized state above barrier forming absorption peak. The calculated positions of absorption peak are in good agreement with experimental results and estimated strength of several absorption peaks is in agreement with experimental results.

Key words: GaAs; multiquantum well; electron interference

1 引言

据德布罗意假设, 电子像所有微观粒子一样具有波粒二象性. 既然电子具有波动性, 它就应该表现其波的干涉特性. 我们从电子波动的观点出发, 讨论了电子在多量子阱结构中的运动, 指出电子波干涉的存在. 实验完全证实了这一理论结果. 本文讨论其理论分析及与实验结果的比较.

2 样品制备及测量结果

用 MOCVD 设备, 在半绝缘 GaAs 衬底上首先生长一层厚 $1\mu\text{m}$ 掺 Si ($n = 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 的 GaAs, 然后生长 GaAs/ $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 多量子阱结构, GaAs 阱层厚 40\AA , 掺 Si ($n = 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 厚 300\AA , 共 50 周期, 最后生长一层厚 $0.5\mu\text{m}$ 掺 Si ($n = 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 的 GaAs. 生长温度 650°C , GaAs 阱层生长速率为 4\AA/s , $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$ 势垒层生长速率为 10\AA/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, 样品理解成矩形, 其相对的两个侧面被抛光成相互平行, 且与样品表面成 45° 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, 其峰位置分别为 706 、 770 、 1046 、 1168 、 1282 和 1653cm^{-1} .

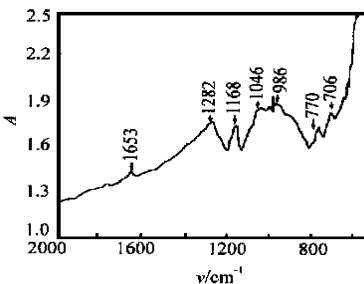


图 1 测量得到的 GaAs/ $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{AS}$ 多量子阱结构的吸收谱

3 分析讨论

GaAs/ AlGaAs 多

量子阱结构具有周期势 $U(Z) = U(Z + nd)$, $d = L_w + L_b$, $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 如图 2 所示, 在有效质量的框架上, 电子波函数为 $\psi(z) = u(z) e^{ik_z z}$

$u(z) = u(z + nd)$, Z 方向的 schrodinger 方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2m_w^*} \frac{d^2}{dz^2} = E, \quad -\frac{L_w}{2} + nd < Z < \frac{L_w}{2} + nd \quad (1)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_b^*} \frac{d^2}{dz^2} + U_0 = E, \quad (n-1)d + \frac{L_w}{2} < Z < nd - \frac{L_w}{2} \quad (2)$$

$$\text{令 } k_w = \left(\frac{2m_w^* E}{\hbar^2} \right)^{1/2}, k_b = \left[\frac{2m_b^* (E - U_0)}{\hbar^2} \right]^{1/2}$$

对 $E > U_0$, 方程 (1), (2) 的解为

$$w(z) = Ae^{ik_w z} + A e^{-ik_w z};$$

$$b(z) = Be^{ik_b z} + B e^{-ik_b z}$$

$w(z)$, $b(z)$ 分别为在阱层和势垒层传播的平面电子波, 第一项表示电子波向 z 方向传播, 第二项表示电子波向 $-z$ 方向传播, K_w, K_b 分别是在阱层和势垒层中的电子波矢. 令 $w = (2/\lambda_w)z$, $b = (2/\lambda_b)z$, λ_w, λ_b 为电子波在阱层和势垒层中的波长, 则 $\lambda_w = h/\sqrt{2m_w^* E}$, $\lambda_b = h/\sqrt{2m_b^* (E - U_0)}$, 对 $E > U_0$, 显然, 可以看出 $\lambda_w < \lambda_b$, 即在势垒区的电子波长大于在阱区的电子波长. 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 $A, A^*, B, B^*, C, C^*, \dots$ 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^*, \dots 反射时的半波损失. 同样, 电子波沿 $-z$ 方向传播时, 在界面 A, B, C, \dots 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

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

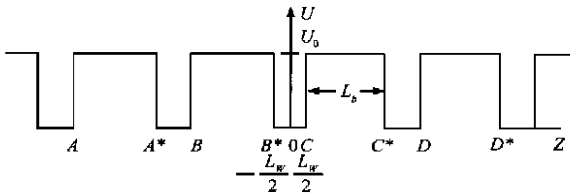


图 2 多量子阱结构的势分布

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, 这实际上意味着势垒对电子波的反射系数为极小. 当波程差等于半波长的偶数倍时, 即

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

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, 这实际上意味着势垒对电子波的反射系数为极大值, 对满足式 (3) 的 b (或 $k_b = (2/\lambda_b)$) 态, 处于该状态上的电子可沿 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. 对满足式 (4) 的 b (或 $k_b = (2/\lambda_b)$) 态, 处于该态上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

$$b = \frac{2}{\lambda_b} = 2 \left[\frac{2m_b^* (E - U_0)}{\hbar^2} \right]^{-1/2} \text{ 代入式 (3), 得}$$

$$E - U_0 = \frac{\hbar^2}{2m_b^*} \left(\frac{n}{L_b} \right)^2, n=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

由于 $m_b^* = (0.067 + 0.083x)m_0^{[1]}$, 若 $x=0.22$, 取 $L_b = 300 \text{ \AA}$ 代入式 (5), 得

$$E - U_0 = 4.9n^2 \text{ meV}, n=1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

当 n 取 1, 2, 3, 4, 5 时, 由式 (6) 计算出的 $E^n - U_0$ 值列于表 1.

量子阱中电子的基态能级可用下式计算^[2]

$$E_0 = \left(\frac{a_c}{2(L_w + L_b)} \right)^2 \quad (7)$$

$$\text{式中 } a_c = \frac{2\hbar}{\sqrt{2m_w^*}}, L_w = \frac{a_c}{\sqrt{b_c - E_c}}, b_c = \frac{m_w^*}{m_b^*}.$$

$$E_c = 0.65 E_g^{[3]}, E_g = 1.247 X, \text{ 对 } X = 0.22, L_w = 40 \text{ \AA},$$

$$m_w^* = 0.067 m_0, m_b^* = (0.067 + 0.083x) m_0, \text{ 代入式 (7) 算得}$$

$$E_0 = 87.5 \text{ meV},$$

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_0 向下移动, 室温下 E_0 下移约 $20 \text{ meV}^{[4]}$, 即 E_0 在 GaAs 导带底以上 67.5 meV 处.

在量子阱中, 电子的费米能级 $E_F = (\hbar^2 k_F^2) / (2m_w^*)$, 其中 $k_F = \sqrt{2}$, $n_0 L_w$ 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 E_F 在基态能级 E_0 以上 28 meV 处. 对 $X = 0.22$, $E_g = 1.247 X = 0.2743 \text{ eV}$, $U_0 = E_c = 0.65 E_g = 0.178 \text{ eV}$, 因此 $U_0 - E_F = 82.5 \text{ meV}$. 由于 $E^n - E_F = (E^n - U_0) + (U_0 - E_F)$, 利用式 (6) 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.

设量子阱中电子服从费米分布, 室温下基态能级以上费米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, 如图 3 所示, 但不能跃迁到强干涉定域态上. 据此观点计算出的吸收峰位置 $E_p = E^n - E_F$, 对 $n = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别为 $87.4 \text{ meV}, 102.1 \text{ meV}, 126.6 \text{ meV}, 160.9 \text{ meV}$ 和 205 meV , 而实验测量到的吸收峰的波数为 $706 \text{ cm}^{-1}, 770 \text{ cm}^{-1}, 1046 \text{ cm}^{-1}, 1282 \text{ cm}^{-1}$ 和 1653 cm^{-1} , 利用 $E_p = h \cdot C \cdot p$, p 是吸收峰的波数, 可以计算出吸收峰对应的光子能量分别为 $88 \text{ meV}, 96 \text{ meV}, 130 \text{ meV}, 159 \text{ meV}$ 和 205 meV , 显然理论计算出的吸收峰位置与实验结果相当一致, 这就充分证明了, 多量子阱结构中电子波干涉的存在.

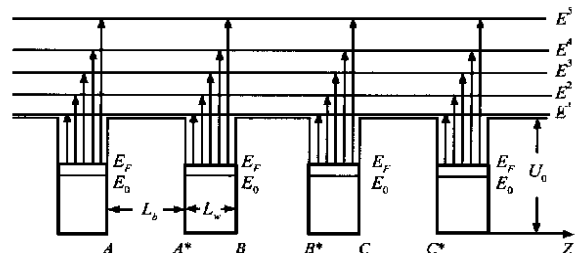


图 3 多量子阱中基态电子向势垒以上弱干涉非定域态能级 E^n 的跃迁

由 $w = h / \sqrt{2m^* E}$, 对不同的 E^n 值, 可计算出相应的电子波长分别为 111 Å, 107 Å, 101 Å, 94 Å 和 86 Å, 其在阱区势垒以上的波函数示于图 4 中.

量子力学理论指出: 电子从初态到末态的跃迁几率 $\propto \int \psi_f dZ$, 即正比于电子初态和末态波函数的交迭积分. 由图 4 可以看出, 在量子阱区, 电子由初态, 即基态 E_0 向末态 E^n 跃迁时, 初态和末态的交迭积分, 当 $n = 1, 2, 3, 4, 5$ 时, 随 n 的增加而增大. 由于 E_0 和 E^1, E^2 态波函数的交迭积分小, 电子跃迁几率小, 因而对应的吸收峰较弱. E_0 和 E^3, E^4 态的波函数交迭积分较大, 电子由 E_0 向 E^3 或 E^4 的光跃迁几率较大, 所以吸收峰较强. E_0 和 E^5 态的波函数交迭积分虽然较上述几种都大, 但由于 E^5 是高能态, E_0 能级上的电子大部分都跃迁到 E^3, E^4 小部分跃迁到 E^1, E^2 态上, 而剩余在 E_0 能级上, 可跃迁到 E^5 态上的电子数量已很少, 故 E_0 向 E^5 态光跃迁的吸收峰很弱. 这样吸收峰强弱的实验结果与理论预计完全一致.

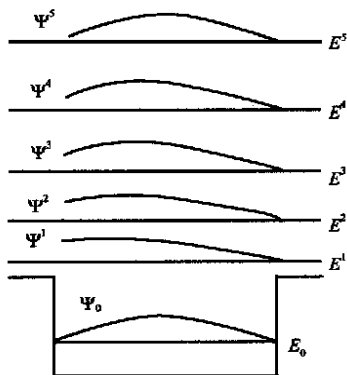


图 4 量子阱中基态和势垒以上弱干涉非定域态的电子波函数

表 1 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构计算和测量的吸收峰位置比较

n	$E^n - U_0$ (meV)	$E^n - E_F$ (meV)	ρ (cm^{-1})	E_p (meV)	w (Å)
1	4.9	87.4	706	88	111
2	19.6	102.1	770	96	107
3	44.1	126.6	1046	130	101
4	78.4	160.9	1282	159	94
5	122.5	205	1653	205	86

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.

在吸收谱中, 由电子干涉引起的处于 $\rho = 1046 \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰, 叠加在一个宽的、峰位置大约在 986cm^{-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_b 无关, 即与电子干涉无关. 而 $\rho = 1168 \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰可能是由于 Si—C 键的振动吸收引起.

4 结论

(1) 在 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构中运动的电子, 具有电子干涉特性. 由于这种电子干涉, 在势垒以上形成弱干涉非定域态的微带和强干涉定域态的微带, 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, 如基态电子, 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. 由此观点出发, 理论上计算出几个吸收峰的位置, 实验测量到的结果与理论计算值符合得很好.

(3) 对吸收峰的强度也做了理论分析, 几个吸收峰强弱的理论预计与实验观测结果也相当一致.

参考文献:

- [1] Sadel Adachi [J]. Appl. phys. 1985, 58(3):R1 - 29.
- [2] Toshihiko Makino [J]. IEEE Journal of quantum electronics, 1996, 32(3):493 - 501.
- [3] Dugan G. et al. Phys. Rev. B, 1985, 32:8395.
- [4] Manasreh M O. et al. Appl. Phys. Lett. 1990, 57(17):1790.

作者简介:



程兴奎 1943 年生, 教授. 1966 年山东大学物理系毕业, 曾作为主要研究者进行超开速开关 Ge 平面隧道二极管和通讯卫星用微波放大隧道二极管的研究, 分别获得山东省优秀科研成果一等奖和山东省科技进步一等奖. 以后进行掺稀土非晶硅材料的研究, 获山东省自然科学优秀学术成果二等奖. 1991 年由国家自然科学基金资助进行 GaAs 量子阱红外探测器的研究, 1993 年作为访问学者赴澳大利亚进修访问, 回国后在山东省科委的资助下继续该领域研究, 研制出的量子阱红外探测器的探测率达国际先进水平. 现承担国家自然科学基金项目, 已发表论文 30 余篇.