

GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的光电流与电子干涉*

程兴奎 马洪磊

(山东大学光电材料与器件研究所, 山东, 济南, 250100)

周均铭 黄 琦

(中国科学院物理研究所, 北京, 100080)

摘要 在 77K 温度, 测量了 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构的光电流, 观测到在 $\nu=1589\text{cm}^{-1}$, 即 $\lambda=6.29\mu\text{m}$ 附近存在一个强电流峰, 分析认为, 该电流峰与多量子阱势垒以上的电子干涉有关, 根据电子干涉理论计算出的电流峰位置与实验结果非常一致.

关键词 多量子阱结构, 光电流, 电子干涉.

PHOTOCURRENT AND ELECTRON INTERFERENCE OF GaAs/AlGaAs MULTIQUANTUM WELL STRUCTURE*

CHENG Xing-Kui MA Hong-Lei

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

ZHOU Jun-Ming HUANG Qi

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Photocurrent spectrum for GaAs/AlGaAs multiquantum well structure was measured at 77K. A strong photocurrent peak at $\nu=1589\text{cm}^{-1}$, i. e. $\lambda=6.29\mu\text{m}$, in the photocurrent spectrum was observed. It was believed that the strong photocurrent peak is relevant to the interference of electrons above the barrier of multiquantum well structure. The calculated position of peak of photocurrent on the basis of theory of electron interference is in very good agreement with the experimental results.

Key words multiquantum well, photocurrent, electron interference.

引言

量子力学指出, 电子具有波粒二象性, 既然电子具有波动性质, 它就应该与光波相类似, 具有波的干涉特性, 本文就实验测量到的多量子阱结构的光电流, 用电子波的干涉理论进行了解释.

1 样品制备及测量结果

用 MBE 设备, 在半绝缘 GaAs 衬底上生长厚 $1\mu\text{m}$ 掺 Si ($n\approx 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 的 GaAs 底层, 然后生长 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱结构, GaAs 阱宽 48\AA , 掺 Si ($n\approx 1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$), Al_{0.3}Ga_{0.7}As 垒厚 100\AA , 共 50 周期, 最后生长厚 $0.5\mu\text{m}$, 掺 Si ($n\approx 2\times$

10^{18}cm^{-3}) 的顶层 GaAs. 样品被腐蚀成 $200\times 220\mu\text{m}$ 的台面, 然后在底层和顶层 GaAs 蒸发 AuGeNi, 光刻出上、下电极, 形成欧姆接触, 并引线、装入杜瓦瓶, 在温度 $T=77\text{K}$ 测量光电流, 测量结果如图 1 所示, 可以看出, 光电流谱中存在多个电流峰, 其中最强的电流峰位置在 $\nu=1589\text{cm}^{-1}$ 附近, 本文仅讨论强电流峰的形成机理, 而对弱峰的分析与讨论将另文讨论.

2 分析与讨论

对上述结构的量子阱, 理论计算得到, 在阱口附近存在一个准束缚态, 即第一激发态, 电子由基态跃迁到第一激发态形成的光电流峰位置应处于 7.95

* 国家自然科学基金(编号:69976016)和山东省自然科学基金(编号:Y98G11107)资助项目
稿件收到日期 2000-05-16, 修改稿收到日期 2000-09-14

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 69976016) and the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (No. Y98G11107)

Received 2000-05-16, revised 2000-09-14

μm 附近,但实验测量出光电流峰位置为 $6.29 \mu\text{m}$,二者相差甚大.这表明:实验测到的强的峰电流不是基态电子跃迁到第一激发态形成的.我们必须用新的观点来解释这一实验结果.

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 所示, 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 $E_s = E = \frac{\hbar^2 K_w^2}{2m_w^*}$,式中 m_w^* 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 $E_s = E - U_0 = \frac{\hbar^2 k_b^2}{2m_b^*}$, m_b^* 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

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

由式(1)可以看出,如果

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

则势垒对电子的反射系数为最小值,即 $R=0$. 如果

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

则势垒对电子的反射系数达最大值.

上述结果也可以从电子干涉的观点导出.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

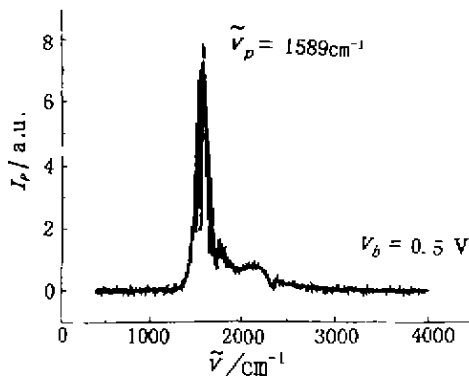


图 1 在 77K 温度下测得的 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 多量子阱结构的光电流谱

Fig. 1 Measured photocurrent spectrum of GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As multi-quantum well structure at 77K

界面反射的两束电子波程差为 $\Delta = 2L_w - \frac{\lambda_b}{2}$,式中 $\frac{\lambda_b}{2}$ 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, λ_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, \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

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

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

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

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)和(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_w 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_w 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 $-Z$) 方面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

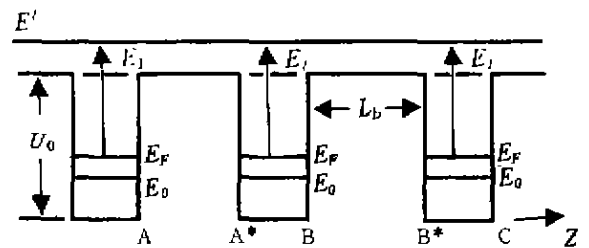


图 2 多量子阱结构的势分布及量子阱中基态电子向势垒以上弱干涉非定域态能级的跃迁

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 above barrier for MQW structure

出现,将

$$K_x = \left[\frac{2m_x^*}{\hbar^2} (E - U_n) \right]^{1/2}$$

代入式(2),得

$$E - U_n = \frac{\hbar^2}{2m_x^*} \left(\frac{n\pi}{L_n} \right)^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

由于 $m_x^* = (0.067 + 0.083x)m_0$, 若 $x = 0.3, L_n = 100 \text{ \AA}$, 代入式(6)得

$$E - U_n = 40.8n^2 (\text{meV}), n = 1, 2, \dots \quad (7)$$

当 $n=1$ 时, $E^1 - U_n = 40.8 \text{ meV}$, 这表明, 在势垒以上, 动能 $E_s = E^1 - U_n = 40.8 \text{ meV}$ 的电子受势垒的反射系数最小。

量子阱中基态能级可由下式计算^[1]

$$E_s = \left(\frac{\pi}{2} \frac{a}{L_n + \Delta L_n} \right)^2, \quad (8)$$

式(8)中 $a = \frac{2\hbar}{\sqrt{2m_x^*}}, b = \frac{m_{rx}^*}{m_x^*}, \Delta L_n = \frac{a}{\sqrt{\hbar \Delta E_s}}$, 对

GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As, $m_{rx}^* = 0.067m_0, m_x^* = (0.067 + 0.083x)m_0, \Delta E_s = 0.65\Delta E_x, \Delta E_x = 1.247x$, 若 $x = 0.3, L_n = 48 \text{ \AA}$, 由式(8)计算后得到, $E_s = 92 \text{ meV}$. 当阱中电子浓度较大时, 由于电子的交换相互作用, 使得量子阱中基态能级下移, 当温度 $T = 77 \text{ K}$ 时, E_n 下移约 22 meV ^[2], 即实际上 $E_s = 70 \text{ meV}$.

在量子阱中电子的费米能级 $E_f = \frac{\hbar^2 K_F^2}{2m_x^*}$, 其中

$K_F = \sqrt{2\pi\sigma} \cdot \sigma = n_s L_n$ 是电子薄层密度, n_s 是体电子密度. 如果 $n_s = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}, L_n = 48 \text{ \AA}$, 可以算得 $E_s = 17 \text{ meV}$, 即 E_s 在基态能级 E_0 以上 17 meV 处, 由此可得, $U_n - E_s = 156 \text{ meV}$, 所以

$$(U_n - E_s) + (E^1 - U_n) = E^1 - E_s = 197 \text{ meV}.$$

设量子阱中电子服从费米分布, 在温度 $T = 77 \text{ K}$ 时, 基态能级 E_0 与 E_f 之间各能态几乎都占据电子, 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, 在外电场作用下形成光电流(见图2).

电子由 E_s 跃迁到弱干涉非定域态所吸收的光子能量为 $h\nu$:

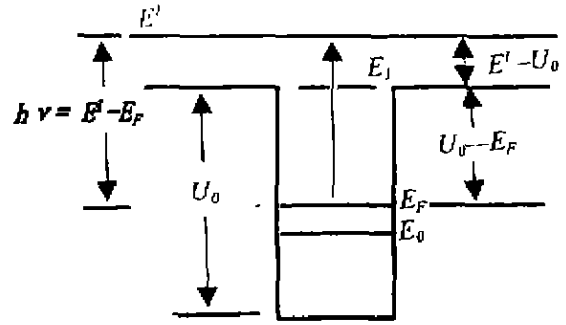


图2 量子阱基态电子光激发示意图
Fig. 3 Schematic diagram of photoexcitation of electron on ground state in quantum well

$$h\nu = (U_n - E_s) + (E^1 - U_n), \nu = \frac{c}{\lambda}$$

因此

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{hc}{(U_n - E_s) + (E^1 - U_n)} \\ &= \frac{1.24}{0.197} = 6.29 \mu\text{m} \end{aligned}$$

由此可见, 光电流峰位置的理论与实验结果非常一致. 图3示出量子阱基态电子光跃迁时吸收的光子能量大小与量子阱有关参数之间的关系.

3 结论

据上所述, 可以得出如下结论:

(1) 在多量子阱结构势垒以上, 由于电子干涉形成弱干涉非定域态和强干涉定域态, 二者随能量增加交替出现.

(2) 当存在光激发时, 量子阱中基态电子跃迁到弱干涉非定域态上, 在外电场作用下形成光电流.

REFERENCES

- [1] Makino T. Analytical formulas for optical gain of quantum well. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, 32(3): 493
- [2] Manasreh M O, Szmulowicz F, Fischer D W, et al. Intersubband infrared absorption in a GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As quantum well structure. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(7): 1790