

超晶格结构中电子的波动性*

程兴奎

(山东大学光电材料与器件研究所, 济南 250100)

周均铭 黄 绮

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2000 年 7 月 20 日收到, 2000 年 9 月 9 日收到修改稿)

在温度 $T = 77\text{K}$ 测量了 GaAs/AlGaAs 超晶格的光电流, 观测到在 $\nu = 1589\text{cm}^{-1}$ 有一个强电流峰, 而在 $\nu = 1779, 2129$ 和 2401cm^{-1} 附近存在弱电流峰. 分析认为, 这些电流峰与电子的波动性有关. 据电子波动理论计算出的光电流峰位置与实验测量结果相当一致.

关键词: 超晶格, 电子, 波动性

PACC: 7240

1 引 言

量子力学理论指出: 电子不仅具有粒子性, 并且还具有波动性. 本文从电子波动性的观点出发, 讨论了电子在 GaAs/AlGaAs 超晶格中的运动及引起的电子干涉, 由此对实验测量出的光电流谱进行了解释.

2 样品制备及测量结果

用分子束外延设备, 在半绝缘 GaAs 衬底上生长厚 $1\mu\text{m}$ 掺 Si ($n = 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 的 GaAs 底层, 然后生长 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 超晶格结构, GaAs 阱宽为 4.8nm , 掺 Si ($n = 1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$), Al_{0.3}Ca_{0.7}As 势垒宽 10nm , 共 50 周期, 最后生长厚 $0.5\mu\text{m}$ 掺 Si ($n = 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 顶层 GaAs. 样品被腐蚀成 $220\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 的台面, 然后在底层和顶层 GaAs 蒸发 Au-GeNi 合金, 光刻出上、下电极, 形成欧姆接触, 并引线, 装入杜瓦瓶, 在温度 $T = 77\text{K}$ 测量样品的光电流. 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于 $\nu = 1589\text{cm}^{-1}$ 处, 而在 $\nu = 1779, 2129$ 和 2401cm^{-1} 附近是几个弱峰. 强电流峰的形成机理另文报道, 本文仅对几个弱峰进行分析讨论.

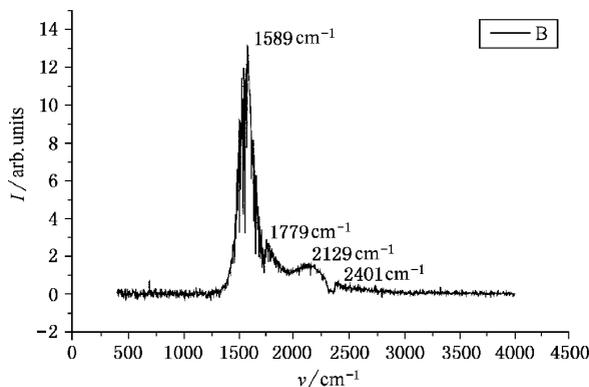


图 1 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 超晶格在 $T = 77\text{K}$ 测量得到的光电流

3 分析讨论

设超晶格结构生长沿 z 方向, 则 GaAs/AlGaAs 超晶格的势分布如图 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 $E_k = E = \frac{\hbar^2 k_w^2}{2m_w^*}$, 式中 m_w^* 和 k_w 分别是电子在 GaAs 阱层中的有效质量和波矢. 处于 AlGaAs 势垒层中能量为 E 的电子, 若 $E > U_0$, 则动能 $K_k = E - U_0 = \frac{\hbar^2 k_b^2}{2m_b^*}$, m_b^* 和 k_b 分别是电子在势垒层

*国家自然科学基金(批准号: 69976016)及山东省自然科学基金(批准号: Y98G11107)资助的课题.

中的有效质量和波矢. 因而, 电子在阱区运动时的波长 $\lambda_w = \frac{2\pi}{k_w} = \frac{h}{\sqrt{2m_w^*E}}$, 电子在势垒区运动时的波长 $\lambda_b = \frac{2\pi}{k_b} = \frac{h}{\sqrt{2m_b^*(E-U_0)}}$. 显然, 对同一能量 E 的电子, $\lambda_b > \lambda_w$, 即某一能量为 E 的电子由势垒区进入阱区电子波长变小.

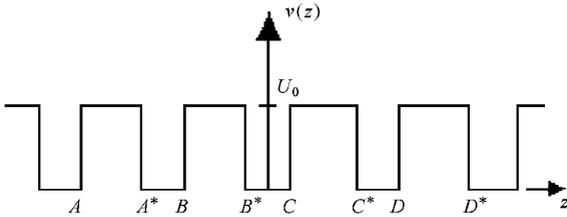


图2 GaAs/AlGaAs 超晶格的势分布

当电子波在 GaAs/AlGaAs 超晶格结构中沿 z 方向传播时, 它受到势垒与量子阱之间界面的反射. 图 2 示出不同势垒与阱的界面 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 $\Delta = 2L_b + \frac{\lambda_b}{2}$, 式中 $\frac{\lambda_b}{2}$ 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. 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

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

则来自同一势垒层两个不同界面反射的两束电子波的干涉强度极小, 即电子对势垒层的透过率为极大.

同理, 同一势阱层两个界面反射的两束电子波的波程差 $\Delta = 2L_w - \frac{\lambda_w}{2}$, $\frac{\lambda_w}{2}$ 是半波损失. 如果

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

则来自同一势阱两个不同界面反射的两束电子波干涉强度为极小, 即电子对阱层的透过率为极大. 如果

$$2L_w - \frac{\lambda_w}{2} = 2n\frac{\lambda_w}{2} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

则来自同一势阱两个不同界面反射的两束电子波干涉强度为极大, 即电子对阱层的透过率为极小.

由 (1) 式得

$$\lambda_b = \frac{2L_b}{n},$$

$$k_b = \frac{2\pi}{\lambda_b} = n \frac{\pi}{L_b} \quad n = 1, 2, \dots,$$

因而电子能量

$$E = U_0 + \frac{\hbar^2 k_b^2}{2m_b^*} = U_0 + \frac{\hbar^2}{2m_b^*} \left(\frac{\pi}{L_b} \right)^2 n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

由 $m_b^* = (0.067 + 0.083x)m_0^{[1]}$, m_0 是电子质量, 取 $x = 0.3$, $L_b = 10 \text{ nm}$, 代入 (4) 式得

$$E^n = U_0 + 0.0408 n^2 (\text{eV}).$$

上式表明, 能量为 E^n 的电子对势垒层的透过率最大. 当 $n = 1$ 时, $E^1 = U_0 + 0.0408 (\text{eV})$, 即

$$E^1 - U_0 = 40.8 \text{ meV}.$$

由 (2) 式得

$$\lambda_w = \frac{2L_w}{n+1},$$

$$k_w = \frac{2\pi}{\lambda_w} = (n+1) \frac{\pi}{L_w},$$

因而电子能量

$$E = \frac{\hbar^2 k_w^2}{2m_w^*} = \frac{\hbar^2}{2m_w^*} \left(\frac{\pi}{L_w} \right)^2 (n+1)^2 \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (5)$$

式中 $m_w^* = 0.067m_0$, 取 $L_w = 4.8 \text{ nm}$, 代入 (5) 式, 得

$$E^{<n>} = 0.244(n+1)^2 (\text{eV}) \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

当 $n = 0$ 时, $E^{<0>} = 0.244 \text{ eV}$, 能量为 $E^{<n>}$ 的电子干涉为极小, 即电子对阱层的透过率为最大.

由 (3) 式得

$$\lambda_w = \frac{4L_w}{2n+1},$$

$$k_w = \frac{2\pi}{\lambda_w} = \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{L_w},$$

电子能量

$$E = \frac{\hbar^2 k_w^2}{2m_w^*} = \frac{\hbar^2}{2m_w^*} \left(\frac{\pi}{L_w} \right)^2 \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

由 $m_w^* = 0.067m_0$, 取 $L_w = 4.8 \text{ nm}$, 得

$$E^{(n)} = 0.244 \left(n + \frac{1}{2} \right)^2 (\text{eV}) \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

能量为 $E^{(n)}$ 的电子对阱层的透过率为最小. 当 $n = 0$ 时得

$$E^{(0)} = 0.061 \text{ eV},$$

$$E^{(1)} = 0.549 \text{ eV}.$$

对 GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 超晶格, $\Delta E_g = 1.247x^{[2]}$, $x = 0.3$ 时, $\Delta E_c = U_0 = 0.65\Delta E_g^{[3]} =$

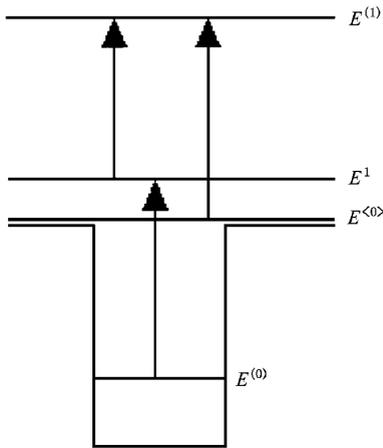


图3 $E^{(0)}, E^{(1)}, E^{<0>}, E^1$ 能级及能级间的电子跃迁

表1 跃迁能的理论值与实验值的比较

能级间电子跃迁		跃迁能理论值	光电流峰位置	跃迁能实验值
初态	终态	/eV	/ cm^{-1}	/eV
$E^{(0)}$	E^1	0.223	1779	0.221
E^1	$E^{(1)}$	0.265	2129	0.264
$E^{<0>}$	$E^{(1)}$	0.305	2401	0.297

0.243eV, $E^{(0)}, E^{(1)}, E^{<0>}, E^1$ 对应的能级及能级间的电子跃迁示於图3.

为了便于比较,由能级间电子跃迁计算出的跃迁能和实验测得的光电流峰位置确定的跃迁能,即吸收的光子能量列于表1.由表1看出,理论计算出的跃迁能与实验测量结果相当一致.

4 结 论

超晶格结构中运动的电子,在量子阱层和势垒层界面可发生反射,不同界面反射的电子波发生干涉.同一量子阱层两个界面或同一势垒层两个界面反射的电子波干涉强度的强弱意味着电子被阱层或势垒层反射的反射率大小,或表明电子对阱层或势垒层的透过率大小.

势垒层两个界面反射的电子波干涉极小值相应的能级表示为 E^n ,阱层两个界面反射的电子波干涉极大与极小值相应的能级分别表示为 $E^{(n)}$ 和 $E^{<n>}$.当存在光激发时,电子由 $E^{(0)}$ 向 E^1 ,由 E^1 向 $E^{(1)}$ 以及由 $E^{<0>}$ 向 $E^{(1)}$ 发生跃迁,这些光电子在外电场作用下形成电流,因而在光电流谱中出现三个弱峰.

[1] S. Adachi, *J. Appl. Phys.*, **58**(1985), R1.

[2] H. C. Casey, M. B. Panish, *Heterostructure Lasers* (Academic, New York, 1978), Pt. A, p. 193.

[3] G. Dugan, H. I. Ralph, K. Moore, *Phys. Rev.*, **B32**(1985), 8395.

WAVING OF ELECTRON IN SUPERLATTICE^{*}

CHENG XING-KUI

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

ZHOU JUN-MING HUANG QI

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

(Received 20 July 2000 ; revised manuscript received 9 September 2000)

ABSTRACT

Photocurrent spectrum of GaAs/AlGaAs superlattice at $T = 77\text{K}$ was measured. A strong photocurrent peak at $\nu = 1589\text{cm}^{-1}$ and several weak peaks at $\nu = 1779$, 2129 and 2401cm^{-1} were observed. It was believed that these photocurrent peaks are relevant to waving of electron in superlattice. The calculated positions of peaks of photocurrent on the basis of the theory of electron waving are in good agreement with experimental results.

Keywords : superlattice , electron , waving

PACC : 7240

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 69976016) , and the Natural Science Foundation of Shandong Province ,China (Grant No. Y98G11107).