

电导法测量 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱的能带偏移

张胜坤 蒋最敏 秦捷 林峰 胡冬枝 裴成文 陆方

(复旦大学表面物理国家重点实验室 上海 200433)

摘要 本文分析了一个单量子阱的随频率变化的 G - V 特性, 提出用电导法测量量子阱的能带偏移. 通过对一个 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 单量子阱的实验 G - V 曲线的分析, 验证了这一方法的可靠性.

PACC: 7320, 7340L

1 引言

近些年来, 人们对量子阱结构的电容-电压 (C - V)、瞬变电容、电导-温度 (G - T) 等电学特性作了较深入的研究, 电容电压法 (C - V)^[1,2]、深能级瞬态谱 (DLTS)^[3,4]、导纳谱^[5,6]等方法都被成功地应用于测量量子阱的能带偏移. 但是, 据我们所知, 还没有人研究过量子阱的电导-电压 (G - V) 特性. 本文分析了一个单量子阱的随频率变化的 G - V 特性, 提出用电导法测量量子阱的能带偏移. 最后, 通过对一个 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 单量子阱的实验 G - V 曲线的分析, 验证了这一方法的可靠性.

2 原理

一个肖特基接触的 $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 单量子阱的电容和电导随外加偏压变化, 可等效为图 1 所示的电路^[7,8]. 图中 $C_d(V)$ 是随偏压变化的 Si 覆盖层中耗尽层的电容, C_{d0} 是覆盖层全部耗尽时的电容, $C_b(V)$ 是缓冲层中随偏压变化的耗尽层电容. C 和 G 分别是外电路所测量得到的电容和电导. C_w 是量子阱的电容, $G_w(V)$ 是量子阱的电导^[7],

$$G_w = \frac{q^2 S V_{th}(T) N_v(T)}{kT} \exp\left(-\frac{\Delta E_v + E_{Fw}}{kT}\right) \quad (1)$$

式中 q 是电子电荷; S 是测量面积; V_{th} 是载流子热运动的平均速率; N_v 是 Si 价带顶的有效态密度; k 是玻尔兹曼常数; T 是温度; ΔE_v 是价带偏移; E_{Fw} 是费米能级与 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 价带顶的距离.

当电压较小时, 覆盖层中的耗尽层不断扩展, 如图 1(a) 所示.

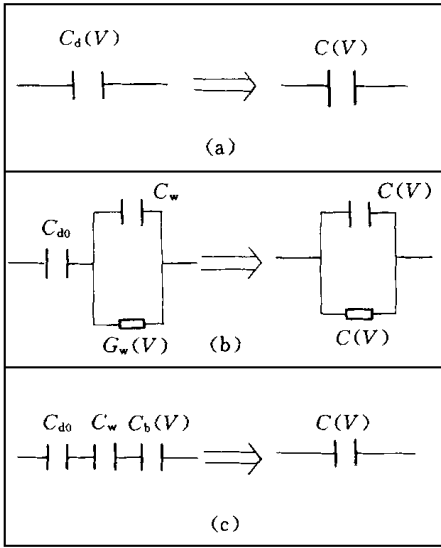


图 1 一个单量子阱的随外加偏压变化的等效电路图

$$C(V) = C_d(V) = \left[\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_A}{2(V + V_D)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中 ϵ 为 Si 的相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; N_A 为 Si 中掺杂浓度; V_D 为肖特基接触引起的自建势

当耗尽层随着偏压的增大扩展至阱的边缘时, 外加电场开始影响到阱中载流子的发射, 量子阱的等效电路如图 1(b) 所示 不难得到此结构的电导和电容的表达式分别为^[9]

$$G(V) = \frac{\omega^2 C_{d0}^2 G_w(V)}{G_w^2(V) + \omega^2 (C_w + C_{d0})^2} \quad (3)$$

$$C(V) = \frac{\omega^2 C_w C_{d0} (C_w + C_{d0}) + C_{d0} G_w^2(V)}{G_w^2(V) + \omega^2 (C_w + C_{d0})^2} \quad (4)$$

其中 ω 为测试角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率

在外电场开始“抽空”阱中载流子的初始阶段, 阱中载流子的浓度依然很高, 不会发生明显变化, E_{FW} 的值很小, 由(1)式知 G_w 很大, 又由(3)、(4)式知此时 G

(V) 趋于零, $C(V)$ 趋于 C_{d0} 当电压进一步增大, 使得 E_{FW} 明显增大, $G_w(V)$ 明显减小时, 在某一个电压位置 V_m , 易使 G_w 满足,

$$G_w = \omega(C_w + C_{d0}) \quad (5)$$

由(3)式易得, 此时 G 出现最大值 G_m , 且有

$$\frac{G_m}{\omega} = \frac{1}{2} \beta \quad (6)$$

其中 $\beta = C_{d0} - C_0$, $C_0 = \frac{C_{d0} C_w}{C_{d0} + C_w}$. 随着偏压的继续增大, G_w 减小至趋于零, 由(3)、(4)式知电导趋于零, 电容 C 趋于常量 C_0

当偏压继续增大后, 电容 C 将是 C_{d0} , C_w 和 $C_b(V)$ 三者的串联, 如图 1(c) 所示

从以上的分析可知, 在不同的频率下的 $G/\omega - V$ 关系曲线上均会出现一幅度相等的峰, 与此同时 $C - V$ 曲线上出现从 C_{d0} 至 C_0 的台阶, 且 G/ω 的峰高是电容台阶的一半 随频率增大, 出现电导峰要求的 G_w 增大, E_{FW} 减小, 导致电压 V_m 减小, 因此 $G/\omega - V$ 曲线中的峰位将随频率增大向低压方向移动

由实验得到 $G - V$ 曲线, 再根据(3)式得到 $G_w(V)$, 然后由(1)式得到 $(\Delta E_v + E_{FW}) - V$ 关系, 从而可以得到能带偏移 ΔE_v .

3 实验

在电阻率为 $0.01\Omega \cdot \text{cm}$ 的 $P^+ - \text{Si}(100)$ 衬底上用分子束外延法生长 450nm 的 Si 缓冲层, 然后生长 10nm 掺硼浓度为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 的 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 量子阱层, 最后覆盖上一层 450nm 的 Si 层 缓冲层和覆盖层掺硼浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 漏电流过大会影响电导的测量 为降低漏电流, 用等离子体增强化学气相沉积的方法在覆盖层上沉积了一层氮化硅绝缘层, 厚度约为 10nm .

样品背面蒸铝并合金化形成欧姆接触, 正面蒸铝形成肖特基接触

本文将测试温度选为 150K, 因为温度太高会增强漏电流的影响, 太低会将阱中的载流子“冻结”^[10]. 用 HP42375A LCR 测试仪在不同频率下对该样品做了电导-电压和电容-电压的测量

4 结果与讨论

在不同频率下测得该样品的 $C-v$ 和 $G/\omega v$ 曲线如图 2 所示. 较小电压下的大的电导是由肖特基势垒引起的. 由图 2 可见, 电容出现了从 C_{d0} 至 C_0 的台阶, 并在台阶所在电压位置出现了电导峰, 且随频率增大, 峰位向低压方向移动. 由图 2 可以清晰地看出所有这些电导峰幅度几乎相等, 约为 $5.4\mu F$, 正好约为电容台阶 $C_{d0}-C_0$ 的一半.

由图 2 还可看出, 随着频率的增大, 电导峰明显增宽. 如前所述, 在高的频率下, 电导峰出现在较低的电压位置, 而在较低电压下, 费米能级随电压变化缓慢, 甚至“钉扎”于无外场时的平衡位置, 因而 G_w 变化缓慢, 导致 G 变化缓慢, 从而展宽了电导峰.

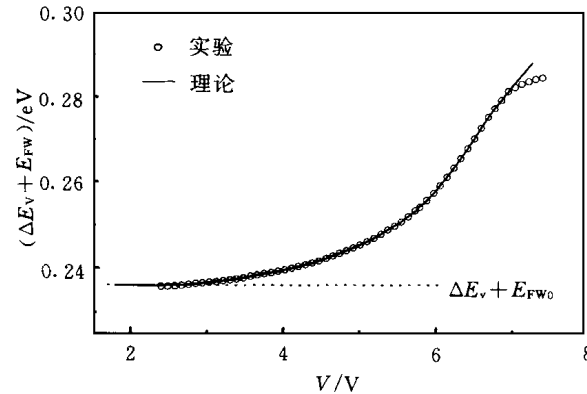


图 3 分别由实验和理论计算得到的 $(\Delta E_V + E_{FW})$ 随电压变化的关系

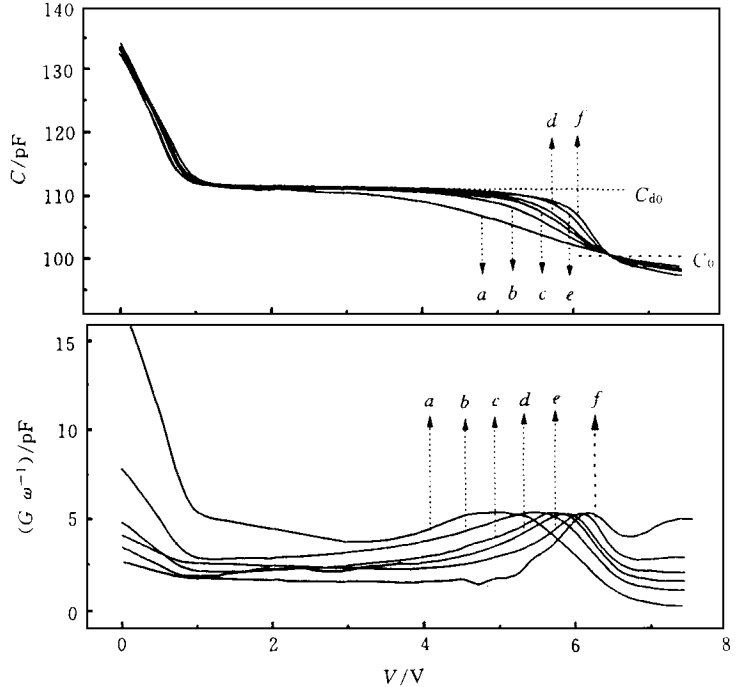


图 2 不同频率下测得的该 Si/Si_{0.7}Ge_{0.3}/Si 量子阱样品的 $C-v$ 和 $G/\omega v$ 曲线
a 3MHz; b 1MHz; c 500kHz;
d 300kHz; e 100kHz; f 50kHz

由 (3) 式和 (1) 式得到 $(\Delta E_V + E_{FW})$ 随电压变化的关系, 如图 3 中空心圆点所示 (为尽量消除漏电流的影响, 仅取图 2 中峰位附近的数据点为有效数据). 为验证其正确性, 用自洽计算的方法计算了该量子阱结构的 $(\Delta E_V + E_{FW})-V$ 关系如图 3 中实线所示, 它与实验点符合得很好. 在高电压处二者有所偏离, 这源于漏电流的影响. 由图 3 可见, 随着电压的增大, $\Delta E_V + E_{FW}$ 先稳定在阱中无外场时的平衡位置 $\Delta E_V + E_{FW0}$, 然后逐渐增大. 在图 3 中,

$\Delta E_V + E_{FW0} = 0.236\text{eV}$, 而 E_{FW0} 可由量子阱中二维载流子浓度与二维载流子态密度之比值来确定^[7], 在本例中 E_{FW0} 约为 12meV , 由此得到能带偏移 $\Delta E_V = 0.224\text{eV}$, 这与该样品导纳谱的测试结果 0.22eV 是一致的

电导法同样适用于 I 型能带排列的量子阱. 具体测量时可用 p 型掺杂样品来测价带偏移, 用 n 型掺杂样品来测导带偏移.

5 总结

电导法可用于研究量子阱样品中费米能级随外加偏压变化的关系, 并最终确定能带偏移. 对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 量子阱的实验结果验证了这一方法是可行的

参 考 文 献

- [1] H. Kroemer, W. Y. Chien, J. S. Harris *et al.* Appl Phys Lett, 1980, **36**: 295
- [2] J. B. Wang, F. Lu, S. K. Zhang *et al.*, Phys Rev., 1996, **B54**: 7979
- [3] P. A. Martin, K. Meehan, P. Gavrilovic *et al.*, J. Appl Phys, 1983, **54**: 4689
- [4] N. Debbar, D. Biswas and P. Bhattacharga, Phys Rev., 1989, **B40**: 1058
- [5] D. V. Lang, M. B. Panish, F. Capasso *et al.*, Appl Phys Lett, 1987, **50**: 736
- [6] J. H. Zhao, Z. Lu, W. Buchwald *et al.*, Appl Phys Lett, 1993, **62**: 2810
- [7] K. Nauka, T. I. Kamins, J. E. Turner *et al.*, Appl Phys Lett, 1992, **60**: 195
- [8] R. E. Cavicchi, D. V. Lang, D. Gershoni *et al.*, Appl Phys Lett, 1989, **54**: 739
- [9] L. F. Marsal, J. M. Lopez-Villegas, J. Bosh *et al.*, J. Appl Phys, 1994, **76**: 1077
- [10] A. Y. Cho, J. Appl Phys, 1975, **46**: 1733

Band Offset Measurements of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ Quantum Wells Studied by Conductance Technique

Zhang Shengkun, Jiang Zumin, Qin Jie, Lin Feng,
Hu Dongzhi, Pei Chengwen, Lu Fang

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433)

Received 6 July 1998, revised manuscript received 12 November 1998

Abstract The frequency-dependent conductance-voltage characteristics of a sample with a single quantum well included are studied. A conductance method is proposed to measure the band offsets of quantum wells. The technique is verified by analyzing the experimental G - V curves of a $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ quantum well.

PACC: 7320, 7340L