

# 量子阱结构的表面势对导纳谱测试结果的影响\*

高 琦 张胜坤 蒋最敏 陆

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

(1999 年 9 月 26 日收到; 1999 年 11 月 1 日收到修改稿)

分别对于不同覆盖层厚度的单量子阱结构的样品以及同一覆盖层厚度不同偏压下的量子阱样品进行导纳谱测试, 由于覆盖层厚度的不同以及外加偏压的不同引起样品结构的电势分布发生变化, 从而用导纳谱测量得到的量子阱的激活能也发生很大变化, 通过变偏压的导纳谱测试, 可对测试结果做出正确的判断.

PACC: 6865; 7320; 7340L

## 1 引 言

半导体量子阱的能带偏移量是量子阱器件的重要结构参数, 它决定着量子阱器件的许多物理特性. 近年来, 人们不断地研究和完善着各种测试单量子阱能带偏移的方法. 诸如  $C-V$ <sup>[1]</sup>, DLTS<sup>[2]</sup>, 导纳谱<sup>[3]</sup>等方法都已成功地运用到量子阱样品能带偏移的测量上. 其中, 导纳谱更是被广泛地用于量子阱样品能带偏移的测量中<sup>[4, 5]</sup>. 但是, 在导纳谱的测试中, 一般没有考虑样品结构的电势分布对导纳谱测试的影响, 而常常采用零偏压下的导纳谱来计算样品的激活能以及能带偏移. 实际上肖特基势垒及外加偏压影响量子阱区域使其附近的电势分布发生变化, 从而导致零偏压下的导纳谱不能真实的反映量子阱样品的能带偏移. 本文对 SiGe/Si 单量子阱样品作了一组导纳谱的测试, 对于不同覆盖层厚度的样品以及同一样品不同偏压下的导纳谱进行分析, 提出只有完整地测量变偏压下的一组导纳谱, 才能比较准确地确定量子阱的能带偏移.

## 2 原 理

量子阱样品在导纳谱测试中, 需将样品表面与金属形成肖特基势垒, 样品背面与金属形成欧姆接触. 根据 Nauka 等人<sup>[3]</sup>提出的等效电路模型, 样品的等效电路如图 1(a)<sup>[6]</sup>所示, 其中  $C_d$  是肖特基势垒电容,  $C_w$  是量子阱的电容.

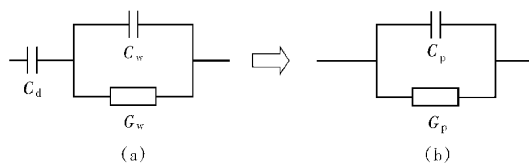


图 1 (a) 量子阱样品等效电路图  
(b) 测试等效电路图

量子阱的电导  $G_w$ <sup>[3]</sup>可表示为

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

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 价带顶的有效状态密度,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是温度,  $\Delta E_v$  是价带的偏移量,  $E_{Fw}$  是费米能级与  $Si_{1-x}Ge_x$  价带顶的距离,  $\Delta E_a = \Delta E_v + E_{Fw}$  是量子阱的激活能. 样品能带结构如图 2(a) 所示. 如果  $E_{Fw}$  随外加电场发生变化, 则  $\Delta E_a$  也会随之发生变化. 实际测量到的整个样品的电导  $G$  和电容  $C$  如图 1(b) 所示, 并可表示为<sup>[7]</sup>

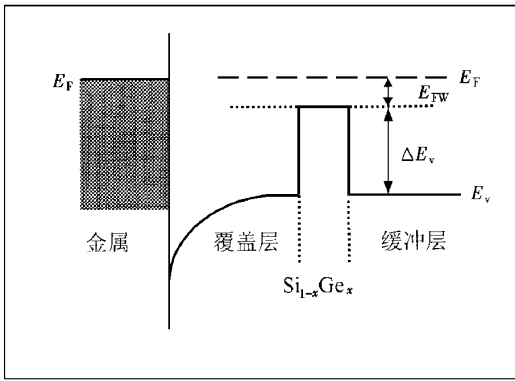
$$G = \frac{\omega^2 C_d^2 G_w}{G_w^2 + \omega^2 + (C_w + C_d)^2}, \quad (2)$$

$$C = \frac{\omega^2 C_w C_d (C_w + C_d) + C_d G_w^2(\omega)}{G_w^2(\omega) + \omega^2 (C_w + C_d)^2}, \quad (3)$$

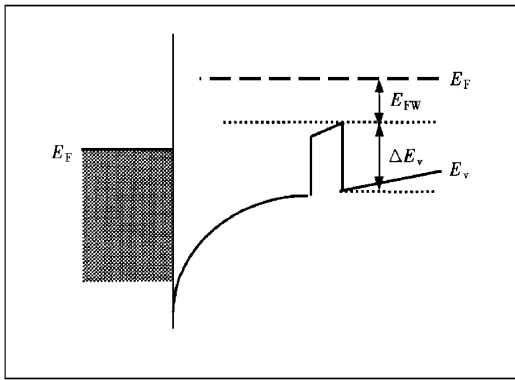
式中  $\omega = 2\pi f$  是测量的角频率.

在温度扫描的过程中, 根据(1)式, 量子阱的电导  $G_w$  随温度指数变化. 由(2)式不难推算出当温度

\* 国家自然科学基金和上海市青年科技启明星计划资助的课题.



(a)



(b)

图2 (a)量子阱样品电势平衡状态下的价带图  
(b)外加场影响下的价带图

变化到某个  $T_m$  时,使得  $G_w$  满足

$$G_w(T_m) = \omega(C_w + C_d). \quad (4)$$

测量得到的  $G$  有最大值<sup>[8]</sup>,  $G/\omega-T$  出现电导峰.由(1)(4)两式,根据  $\ln(\omega/T_m)1/kT_m$  直线关系的斜率可确定激活能  $\Delta E_a$ ,而  $E_{Fw}$  可以根据量子阱中二维态密度和二维载流子密度之比来确定<sup>[3]</sup>.所以量子阱样品能带偏移  $\Delta E_v$  可由  $\Delta E_a - E_{Fw}$  求出.

当肖特基势垒或外加偏压影响到量子阱区域使量子阱附近的电势分布发生变化,量子阱的能带发生弯曲,如图 2(b),费米能级与  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  价带顶的距离  $E_{Fw}$  变大,所以量子阱相应的激活能  $\Delta E_a = \Delta E_v + E_{Fw}$  变大.根据(1)式,导纳谱测试在对温度扫描的过程中,出现电导峰时所对应的温度  $T$  也相应变大.所以随着外场增大,同一频率下的电导峰也会逐渐向高温端移动.

### 3 实验结果

实验样品是用分子束外延技术,在电阻率为

$0.01 \Omega \cdot \text{cm}$  的  $\text{P}^+ \text{-Si}(100)$  衬底上依次生长 450 nm 的 Si 缓冲层、10 nm 的  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  量子阱层及 Si 覆盖层.样品 A, B, C 的覆盖层厚度分别为 450 nm, 320 nm, 280 nm.缓冲层和覆盖层掺硼浓度为  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,量子阱中的掺硼浓度为  $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .样品的背面蒸铝合金形成欧姆接触,正面蒸铝形成肖特基势垒.

导纳谱的测量是通过由计算机控制的 HP4275ALRC 仪及 FLUKE8840A 数字多用表所组成的测试系统进行的.

对三块样品分别作零偏下的导纳谱测试.同一频率下的  $G/\omega-T$  曲线如图 3 所示.当覆盖层厚度从 450 nm 减小到 320 nm 时,导纳谱峰位移动较小,此时因为覆盖层较厚,肖特基势垒宽度还未扩展到量子阱区域,如图 2(a)所示.当覆盖层厚度从 320 nm 减小至 280 nm 时,覆盖层较薄,肖特基势垒不仅使得覆盖层内的载流子耗尽,而且影响到量子阱区域使其电势发生变化,使得量子阱价带顶到费米能级间的距离迅速变大,如图 2(b)所示,  $E_{Fw}$  增加,激活能  $\Delta E_a$  也随之明显增加.根据(1)(4)两式,电导峰的峰位会向高温端移动.三块样品的激活能,计算结果如下表 1 所示.样品的激活能随覆盖层厚度的减小而增加.

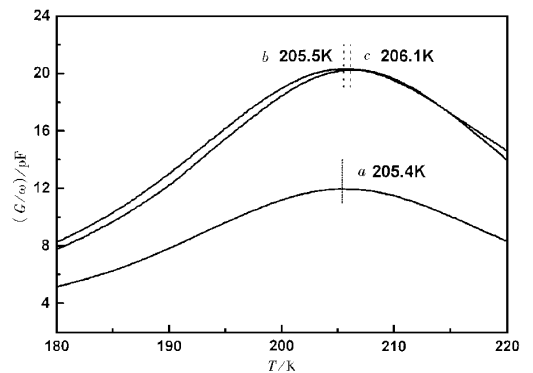


图3 同一频率下零偏时不同覆盖层厚度的样品的  $G/\omega-T$  曲线 a 为 450 nm, b 为 320 nm, c 为 280 nm

表 1 导纳谱激活能随覆盖层厚度的变化

覆盖层厚度	450 nm	320 nm	280 nm
1000 kHz 电导峰峰位	205.4 K	205.5 K	206.3 K
激活能 $\Delta E_a/\text{meV}$	0.244	0.245	0.248

量子阱区域的电势也会随外加电场变化而变化.为了进一步研究外场对其的影响,对于样品 A 进行变偏压下的导纳谱测量.从 0 伏开始每隔 0.3

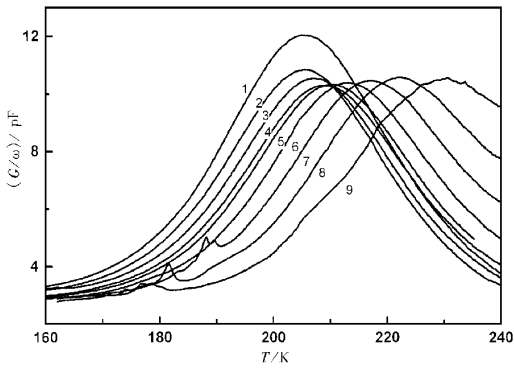


图 4 同一样品不同偏压下的  $G/\omega$ - $T$  曲线

1 为 0 V 2 为 0.3 V 3 为 0.6 V 4 为 0.9 V 5 为 1.2 V 6 为 1.5 V 7 为 1.8 V 8 为 2.1 V 9 为 2.4 V

V 做一个导纳谱测试,其结果如图 4 所示.随着外加电压的增加,电导峰的峰位逐步向高温端移动,而且移动的趋势逐渐增大.这是因为当外加场较小时,只引起覆盖层内的电子耗尽,而对量子阱的能带影响较小,此时费米能级与  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  价带顶的距离  $E_{\text{Fw}}$  随电压变化比较缓慢,电导峰移动较小.随着外加偏压逐渐增大,样品的耗尽区逐步扩展到量子阱区域,使电势能发生明显变化,费米能级随偏压的增加迅速远离量子阱价带顶,所以电导峰移动的趋势也逐渐增大.

对于样品 A 和样品 C,由不同偏压下的导纳谱根据  $\ln(\omega/T_m) - 1/kT_m$  直线关系计算了激活能  $\Delta E_a$ ,如图 5 所示.覆盖层较薄的样品 C 的激活能随偏压的增加迅速增加,覆盖层较厚的样品 A 的激活能在偏压小于 0.3 V 时基本上没有变化,如图中水

平虚线所示.所以对量子阱样品进行导纳谱测试时,可以进行变偏压下的一组导纳谱测试,取不随外场变化下的  $\Delta E_a$  来计算量子阱的能带偏移  $\Delta E_v$ .根据二维载流子态密度和二维载流子密度之比,  $E_{\text{Fw}} = 27 \text{ meV}$ ,所以量子阱的能带偏移  $\Delta E_v = \Delta E_a - E_{\text{Fw}} = 0.217 \text{ eV}$ .

由以上分析可以得出,由于肖特基势垒和外加偏压使得量子阱附近的能带结构变化很大,所以对于量子阱而言,导纳谱所测得激活能必须考虑覆盖层电势变化的影响.只有当样品的耗尽区还没有扩散到量子阱区域,量子阱的电势处于平衡状态,此时用导纳谱测得的结果才能比较准确地计算出量子阱的能带偏移.对于某些覆盖层较薄的量子阱样品,零偏压下的肖特基势垒已经扩展到了量子阱区域,所以即使不加偏压,量子阱价带顶到费米能级间的距离也已增大,所以导纳谱所测得的结果必须考虑电势分布影响.

## 4 结 论

本文对于单量子阱样品不同覆盖层厚度和不同偏压下的导纳谱进行分析,提出了由于肖特基势垒和外加偏压对费米能级和价带顶之间的距离影响很大,所以在计算能带偏移时必须扣除这一影响,才能得到较为准确的数值.

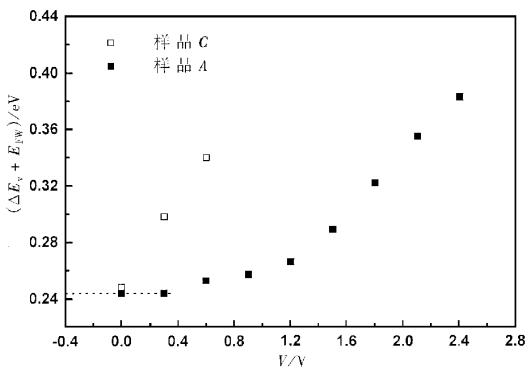


图 5 不同样品在不同偏压下的  $(\Delta E_v + E_{\text{Fw}}) - V$  的关系

- [1] H. Kroemer, W. Y. Chien, J. S. Harris, D. D. Edwall, *Appl. Phys. Lett.* **36**(1980) 295.
- [2] P. A. Martin, K. Meehan, P. Gavrilovic, *J. Appl. Phys.*, **54**(1983) A689.
- [3] K. Nauka, T. I. Kamins, J. E. Turner, C. A. King, J. L. Hoyt, J. F. Gibbons, *Appl. Phys. Lett.* **60**(1992) 195.
- [4] D. V. Lang, M. B. Panish, F. Capasso, J. Allam, R. A. Hamm, A. M. Sergent, *Appl. Phys. Lett.* **50**(1987) 736.
- [5] J. H. Zhao, Z. Lu, W. Buchwald, D. Coblenz, S. McAfee, *Appl. Phys. Lett.* **62**(1993) 2810.
- [6] S. H. Zhang, Z. M. Jiang, J. Qin, D. Z. Hu, F. Lu, Z. Wang, *J. Appl. Phys.* **84**(1998) 5587.
- [7] F. Lu, J. Y. Jiang, H. H. Sun, D. W. Gong, X. Wang, *J. Appl. Phys.* **75**(1994) 2957.
- [8] L. F. Marsal, J. M. Loper-villegas, J. Bosh, *J. Appl. Phys.* **76**(1994) 1077.

# ADMITTANCE SPECTROSCOPY AFFECTED BY SURFACE POTENTIAL IN QUANTUM WELL STRUCTURE

GAO QI ZHANG SHEN-KUN JIANG ZUI-MIN LU FANG  
( *Surface Physics Laboratory( State Key Laboratory ) ,Fudan University ,  
Shanghai 200433 ,China* )

( Received 26 September 1999 ; revised manuscript received 1 November 1999 )

## ABSTRACT

The activated energy of single quantum well structures obtained by the admittance measurements is varied with different thickness of capping layer and with one sample under different applied bias voltages. The electric potential distribution is the key effect on the energy variation. The correctness of the measured results can be judged by using the admittance measurements under different applied bias voltages

**PACC** : 6865 ; 7320 ; 7340L