

导纳谱测量半导体量子阱的量子限制效应

朱海

(复旦大学物理系, 上海 200433)

摘要: 作为探测研究半导体深能级缺陷的手段, 导纳谱测试方法被逐渐开发拓展, 比如测量异质结材料的能带偏移. 本文介绍了利用导纳谱测量半导体量子阱的量子限制效应的实验原理方法以及装置系统, 并且对一些半导体量子阱样品进行了测量, 得到了激活能等实验结果.

关键词: 导纳谱; 量子阱; 量子限制效应.

引言

量子限制效应是指固体材料结构的尺度缩小到一定值, 比如纳米量级时, 能态结构发生变化开始表现出量子特性, 比如形成分立能级. 此时材料的电、磁、光、声、热平衡态以及输运性质与宏观材料相比有很多特殊之处. 尺度对材料性质的量子限制效应影响, 可以施加在三个维度方向上, 比如量子点材料、纳米团簇等零维量子材料; 也可表现为对两个维度的限制, 比如纳米线、纳米棒等一维量子材料; 或者作用在一个维度上的限制, 比如量子阱结构等二维量子材料.

半导体量子限制效应通常研究的是半导体量子阱材料中载流子表现出的特殊的输运性质. 对于分子束外延生长得到的异质结结构量子阱材料, 载流子的横向输运性质与体材料无异, 而纵向输运由于受到量子限制效应的作用, 与横向的情况有较大差别.

导纳谱测试方法最早被用于半导体 PN 结或肖特基势垒空间电荷区内深能级缺陷的探测研究^{[1][2]}. 后来发展了利用导纳谱测量异质结材料能带偏移的方法. 此方法可以用作 GeSi 量子阱结构激活能的测定. 半导体量子阱的导纳行为一般采用两个模型来解释, 下面主要以载流子热发射模型为基础进行讨论^[3].

导纳谱测试原理

用于导纳谱测试的半导体量子阱样品一

般是基于中阻 p 型硅衬底的 SiGe 量子阱. 样品的正面镀上铝质肖特基小圆点电极, 衬底面则镀上整块的欧姆接触铝电极.

在金属-p 型半导体肖特基二极管结构中, 假设肖特基势垒区内的载流子全部耗尽, 即耗尽层近似, 那么肖特基势垒宽度 W 在直流偏压 V 的作用下会发生变化^[4]. 一般这个直流偏压反向加在样品上. 若在 V 上叠加一个交变小信号, 那么势垒区的能带也随之变化弯曲, 这将引起势垒区边缘的缺陷深能级与半导体导体价带之间空穴载流子的发射与俘获. 对于量子阱结构样品, 势阱内的量子化分立能级就相当于前面的缺陷深能级, 如图 1 中短虚线为负偏压增大之后的价带.

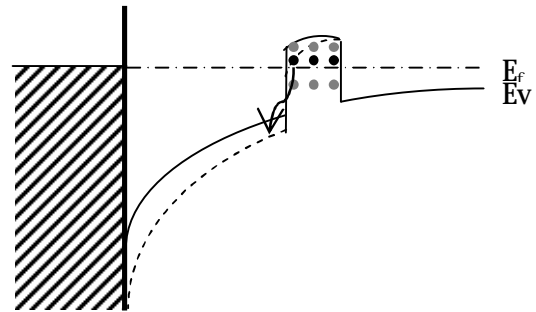


图 1 量子阱深能级及能带随外加偏压下变化

当圆频率为 ω 的交变小信号加于样品两端时, 量子阱中的电荷变化所产生的交变电流为:

$$i(t) = -dQ/dt = e_p \tilde{Q}(t)$$

式中 e_p 为量子阱中的空穴热发射率, $\tilde{Q}(t)$ 为将要从量子阱中发射的电荷密度, 可以写总的将发射的电荷 dQ 减去已经发射出去的电荷量 $\int_0^t idt$. 在交变信号很小时, 量子阱总的电荷变化量 dQ 可以近似正比于信号电压 dV :

$$dQ = \beta dV$$

式中参数 β 由量子阱内外空穴浓度变化率决定. 交变小信号电压幅度为 dV_0 , 则:

$$i(t) = e_p \left(\beta dV_0 e^{j\omega t} - \int_0^t idt \right)$$

解此方程可得量子阱的电容 C_w 和电导 G_w :

$$C_w = \beta \frac{e_p^2}{e_p^2 + \omega^2}$$

$$G_w = \beta \frac{e_p \omega^2}{e_p^2 + \omega^2}$$

量子阱样品的总电容为量子阱电容 C_w 和肖特基势垒电容 C_0 之并联:

$$C = C_w + C_0$$

而在样品缺陷较少, 漏电流可以忽略时, 总电导可以近似等效为量子阱电导:

$$G = G_w$$

通过量子阱中载流子的热发射和俘获的平衡关系可以推导出量子阱中的空穴热发射率表达式:^[5]

$$e_p = \alpha \sqrt{T} \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

式中 α 为与温度无关的常量, E_a 为发生载流子交换的量子阱能级的激活能.

由于 e_p 随温度变化, C_w 与 G_w 也相应随温度变化, 故可以通过测量量子阱样品在一定温度范围内的电容 C 与电导 G 来分析 e_p 与温度的关系, 以得到 E_a 等量的值. $G - T$ 图谱就是所谓的导纳谱.

典型的导纳谱是一个中间高两头低的曲线, 而 $C - T$ 曲线为由阶跃连接的两个平台. 在低温端 $e_p \rightarrow 0$, 显然 $G \rightarrow 0$, $C \rightarrow C_0$; 在高温端 $e_p \rightarrow \infty$, 而且 ω 为有限值, 显然 $G \rightarrow 0$, $C \rightarrow C_0 + \beta$.

由电导对温度一阶导数为零可得极值条

件:

$$e_p = \omega$$

而且电导极大值:

$$G_{max} = \beta \omega / 2$$

为了确定 E_a , 可以在多个频率下测量导纳谱, 找出每个频率 ω 对应的导纳峰温度 T_m , 也就是 e_p 对应的温度. 根据前面的量子阱中的空穴热发射率表达式, 由这些 $e_p - T$ 数据作 $\ln \frac{e_p}{\sqrt{T}} - \frac{1}{T}$ 直线图, 可以由斜率得到 E_a , 由截距得到 α .

使用单频率的一条导纳谱线也能够确定 E_a 等值. 由于 β 与电导极大值满足关系:

$$\beta = \frac{2G_{max}}{\omega}$$

带入量子阱电导表达式:

$$G = \frac{2G_{max}}{\omega} \cdot \frac{e_p \omega^2}{e_p^2 + \omega^2} = \frac{2G_{max} e_p \omega}{e_p^2 + \omega^2}$$

解此关于 e_p 的方程可得:

$$e_p = \omega \left\{ \frac{G_{max}}{G} \pm \left[\left(\frac{G_{max}}{G} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \right\}$$

其中 $T < T_m$ 时取负号, $T > T_m$ 时取正号. 直接取一个频率下的一条导纳谱线中的数据, 根据一条导纳谱线可以得到若干 $G - T$ 关系, 即得到 $e_p - T$ 关系. 后面的处理与多频测试法相同. 由于实际情况总是存在漏电, 但在导纳峰附近漏电对电导测量值的影响是最小的. 所以单频法应该取导纳峰附近的数值进行处理分析.

另外, $\frac{dC}{dT} - T$ 曲线也会出现峰值, 在交变测试信号频率很大时, 极值条件也是 $e_p = \omega$, 而且峰高为 $\beta/2\omega$. 在漏电影响较大时, 利用 $\frac{dC}{dT} - T$ 曲线来确定 $e_p - T$ 关系是更可靠的一种手段.

除了载流子热发射模型外, 等效电路模型也能够解析半导体量子阱材料的电导行为^{[6][7]}. 采用等效电路模型也有使用多频或单频测试的处理分析方法.

导纳谱测量系统

本实验需要测量一定温度范围内半导体量子阱样品的电容、电导值。导纳谱的测量温度范围一般从 100K 到 200K。采用液氮作为冷源将样品冷却到其沸点 77K 附近，然后令其自然缓慢升温，同时进行电容和电导的测量。数据由计算机实时记录。

实验测量系统主要由 LCR 表、热电偶系统、GPIB 连接控制系统和样品架组成。

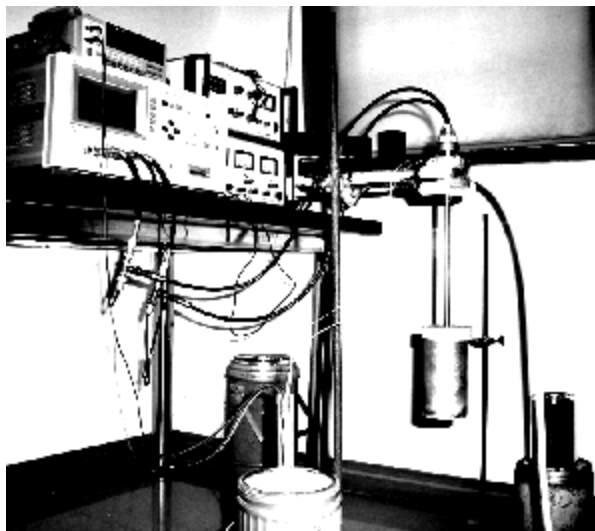


图 2 导纳谱测量系统实图

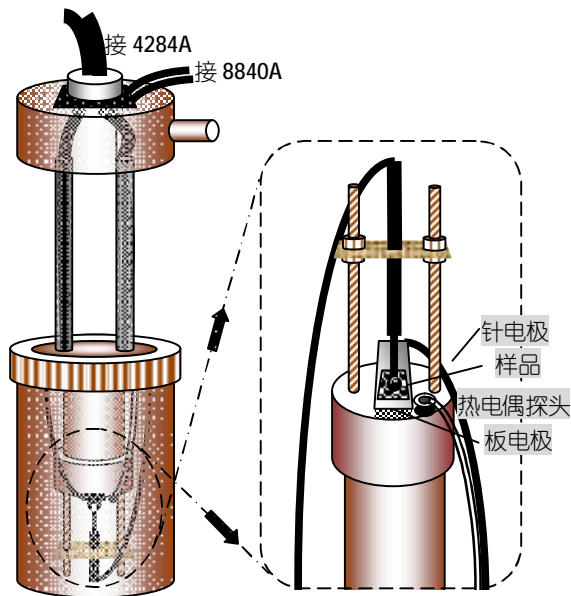


图 3 样品架及电极附近示意图 (右)

测量样品的电容、电导采用 Agilent 公司的 4284A 型精密 LCR 表。它基于自动平衡交流电桥的原理，能够测量 0.01nS 到 99.9999S 之间的电导以及 0.01fF 到 9.99999F 之间的电容，精确度一般可达 0.05%，并且以 6 位数字分辨显示。

热电偶系统采用铜-康铜（铜镍合金）细丝热电偶（T 型热电偶），并且以 FLUKE 公司的 8840A 型数字万用表测量热电势。该万用表有 5½位分辨显示能力，测量直流电压可以显示到 0.001mV，标称精度可达 0.005%。

4284A 和 8840A 都通过 GPIB 与计算机连接，并且在自编的实验测量程序控制下联机工作。实验测量程序可以设置 4284A 的工作参数，控制测量过程，接收记录 4284A 和 8840A 传回的测量结果数据。

样品架是一个特制的金属腔系统。见图 3，样品固定于干燥的腔内，外加电极应保证接触稳定可靠。样品与样品架绝缘，而且与热电偶探头保持良好导热性。

装载好样品后，将样品架浸于液氮之中。当整个样品架热平衡，样品温度降到符合要求的程度，将样品架拔出液氮，使其缓慢升温。在升温过程中就可以按照预先设定的测试频率、外加偏压等参数进行电容与电导的测试。

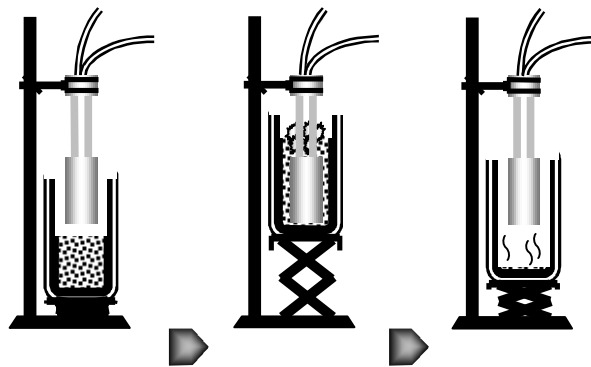


图 4 样品架预备、降温过程、升温过程

数据结果

对一块分子束外延生长的三层量子阱样品进行测试。样品事先在背面镀上了一整块欧姆接触铝电极，正面镀了若干小圆点肖特基接触铝电极。

Si	2500Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³
Si _{0.7} Ge _{0.3}	100Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁷ cm ⁻³
Si	500Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³
Si _{0.7} Ge _{0.3}	100Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁷ cm ⁻³
Si	500Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³
Si _{0.7} Ge _{0.3}	100Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁷ cm ⁻³
Si	2500Å	B ⁺ : 1 × 10 ¹⁶ cm ⁻³
Si Substrate		

图 5 量子阱样品结构及参数

在零偏压下, 将此样品在 100K 到 250K 范围内作导纳谱测试得到了导纳峰. 测试频率取 1MHz、300kHz、100kHz、80kHz 和 50Hz. 实验结果表明峰的位置随测试频率的升高而向高温端移动, 而且峰高也随频率的升高而增大. 对每个频率下的导纳谱数据, 在导纳峰附近 $\ln e_p/T^{-0.5}$ 与 T^{-1} 成线性关系.

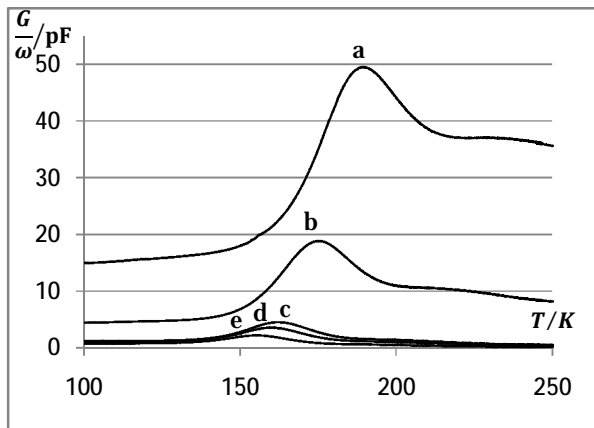


图 6 量子阱样品的导纳谱

a:1MHz; b:300kHz; c:100kHz; d:80kHz; e:50Hz

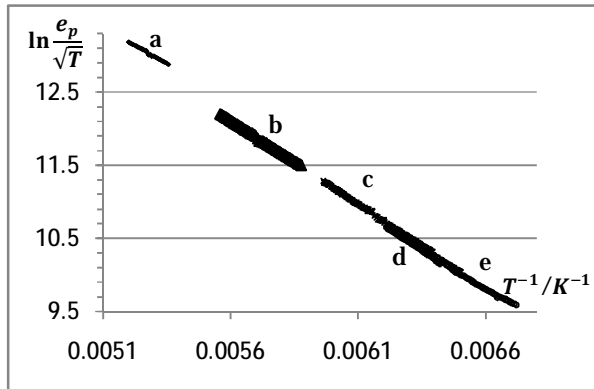


图 7 单频分析法得到的 $\ln e_p/T^{-0.5} - T^{-1}$ 直线图

a:1MHz; b:300kHz; c:100kHz; d:80kHz; e:50Hz

尽管在升温的过程中多频同时测试, 按照单频分析法分别处理每条导纳谱的数据, 分别得到激活能:

f/Hz	E_a/eV
1000000	0.17
300000	0.19
100000	0.20
80000	0.19
50000	0.18
AVERAGE	0.19

故该量子阱样品由于量子限制效应产生的量子阱能级的激活能为 **0.19eV**.

结论分析

对于间距较大、耦合较小的多量子阱材料, 导纳谱测量得到的结果受外加直流偏压的影响. 一般来说, 无偏压或偏压很小时, 势垒区边界在第一个量子阱附近, 因此测量得到的实际上是第一个量子阱的导纳谱. 随着反向偏压不断增大, 势垒区向样品衬底方向扩散, 可能在第一个量子阱完全耗尽之后到达下一个量子阱, 这时测得的就是第二个量子阱的导纳谱. 事实上, 多量子阱材料的电导行为可能表现出双导纳峰, 对应与量子阱不同能级上载流子的发射与俘获. 随着阱宽的增大, 量子限制效应越来越弱, 能级退简并, 导纳峰展宽, 双峰逐渐合并.

由于导纳峰出现的条件是 $e_p = \omega$, 而 e_p 随着温度升高而增大, 因此使用的测试信号频率越高, 导纳峰的温度越高. 而且测试频率越高, 样品电导值也越大, 此时 LCR 表测量的相对误差减小.

实验测量中, 数据点并非理想的平滑曲线. 在导纳峰附近, 这种影响可能导致激活能计算出现严重偏差. 在确定峰位和峰高的时候, 需要仔细观察峰附近区域的导纳谱线, 适当的进行平滑处理.

作为探测研究半导体深能级缺陷的手段, 导纳谱测试方法虽然不及 DLTS 谱灵敏, 但是其操作和数据处理相对简便, 在研究半导体量子限制效应领域取得了理想的结果.

参考文献

- [1] W. G. Oldham, S. S. Naik. Admittance of p-n junctions containing traps. *Solid-state Electronics* 15, 1085-1096 (1972)
- [2] G. Vincent, D. Bois, P. Pinard. Conductance and capacitance studies in GaP Schottky barriers. *J. Appl. Phys.* 46, 5173 (1975)
- [3] 盛麓, 蒋最敏, 陆昉, 黄大鸣. 硅锗超晶格及低维量子结构. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [4] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学. 西安: 西安交通大学出版社, 1997.
- [5] Debbar N., Biswas D., Bhattacharya P. Conduction-band offsets in pseudomorphic $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ quantum wells (0.07 less-than-or-equal-to 0.18) measured by deep-level transient spectroscopy. *Phys. Rev. B* 40, 1058-1063 (1989)
- [6] Fang Lu, et al.. Single-frequency admittance spectroscopy measurement of band offset in a Si/Si_{1-x}Ge_x/Si quantum well. *J. Appl. Phys.* 75, 2957 (1994)
- [7] D. V. Singh, et al.. Admittance spectroscopy analysis of the conduction band offsets in Si/Si_{1-x-y}Ge_xC_y and Si/Si_{1-y}C_y heterostructures. *J. Appl. Phys.* 85, 985 (1999)

Measurement of Semiconductor Quantum Well's QCE by Admittance Spectroscopy

ZHU Hai

(dept. of physics, Fudan Univ., Shanghai 200433, P.R.C)

Abstract: Initially as a method to study deep-level defects in semiconductor materials, admittance spectroscopy has been an evolutionary technique. For instance, it has been employed to measure the band offset in a heterogeneous junction material. An experimental method and equipment system of admittance spectroscopy to measure the QCE (Quantum Confinement Effect) in semiconductor quantum wells is presented in this paper. Some semiconductor quantum well samples has been measured, gaining some results including the activation energy.

Keywords: admittance spectroscopy; Quantum Well; Quantum Confinement Effect; QEC