

**Introduction to the Experiment of Semiconductor
QCE Measurement by Admittance Spectroscopy**

导纳谱测量半导体量子限制效应实验介绍

ZHU Hai
2008.6

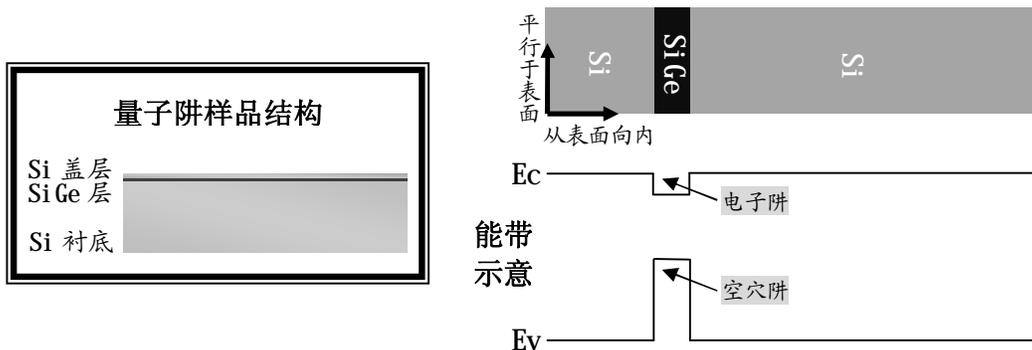
背景说明

量子限制效应

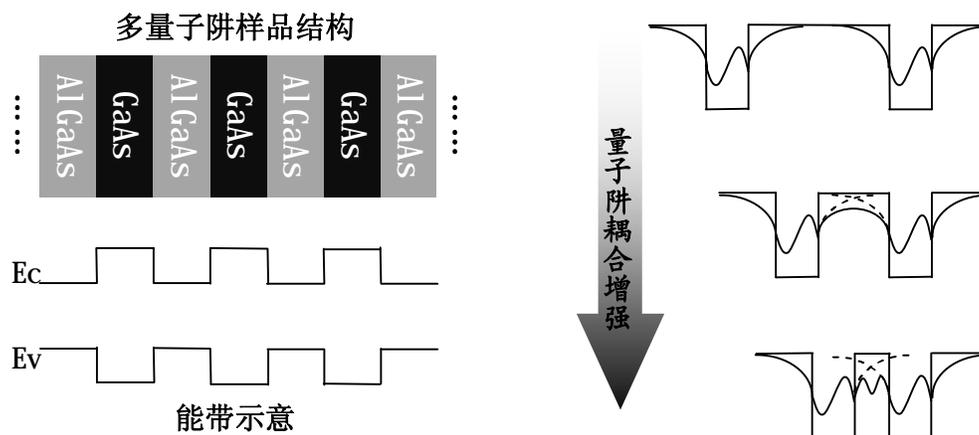
量子限制效应（QCE, Quantum Confinement Effect），是指固体材料结构的尺度缩小到一定值，比如纳米量级时，能态结构发生变化开始表现出量子特性，比如形成分立能级。此时材料的电、磁、光、声、热平衡态和输运性质与宏观材料相比有很多特殊之处。尺度对材料性质的量子限制效应影响，可以施加在三个维度方向上，比如量子点材料、纳米团簇等零维量子材料；也可表现为对两个维度的限制，比如纳米线、纳米棒等一维量子材料；或者作用在一个维度上的限制，比如量子阱结构等二维量子材料。半导体量子限制效应通常研究的是半导体量子阱或者量子点结构中载流子表现出的特殊性质。

量子阱

量子阱结构指的是在半导体衬底上生长若干层不同材料、不同掺杂情况的半导体薄膜。此时能带随材料的从深空间分布图中可以看到若干台阶、势垒或势阱。当膜十分薄时，势阱宽度小于载流子平均自

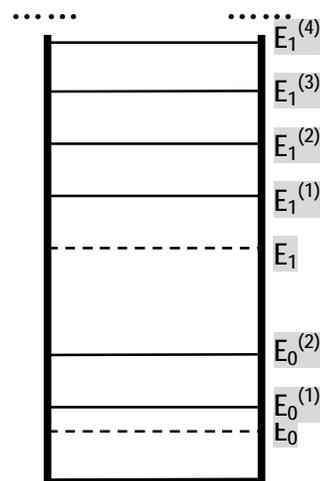


由程，量子限制效应出现，这种势阱就是量子阱。最简单的情况是在 Si 衬底上外延生长几纳米厚的 SiGe 层，然后再在顶部外延生长一层 Si 层，形成上页图示的 Si/SiGe/Si 量子阱结构。由于在 SiGe 层，价带的偏移远大于导带的偏移，故 Si/SiGe/Si 主要是空穴量子阱。这里说明两点：1) 采用 SiGe 层作为量子阱是为了与 Si 衬底晶格尽量匹配，以保证外延生长的薄膜质量高、缺陷低；2) 能带偏移的大小决定于材料的种类、合金的组分以及应变分布情况。如果在 Si 衬底上周期性生长 SiGe 和 Si 薄膜，就可以得到多量子阱结构。下左为 GaAs/AlGaAs 多量子阱结构示意图。由于此势阱非理想无限深势阱，解一维薛定谔方程可以知道载流子处于散射态，势阱外有贯穿的波函数。如下右图，势阱的间距影响各势阱贯穿波函数重叠、耦合的情况。如果势阱的间距较大，各势阱没有耦合，可以看作一些量子限制效应明显的单阱依次排列；如果势阱的间距很小，波函数严重重叠，各势阱相互耦合，此时材料的量子限制效应减弱。在这种情况下，载流子能相对自由的穿过各势阱的壁，各势阱的能级形成能带，这就是所谓的超晶格。



量子点

量子点结构指的是在半导体衬底上生长的具有纳米尺度的颗粒，在单电子超微器件，光电子器件等应用中是很热门的研究对象。由于量子点十分微小，载流子被束缚在很小的区域中，就如同原子核对价电子的作用一般。所以量子点也被称为人造原子，是零维量子材料。显然，受到量子点中的载流子受到三维的量子限制效应影响，也表现出分立的能级。对于这个性质，量子点与量子阱类似。量子点样品一般采用分子束外延（MBE, molecule beam epitaxy）方法，在 Si 衬底上生长自组织生长的 Ge 量子点。然后覆盖一薄层 Si。同样，可以周期性生长多层量子点，情况与前面讨论的多量子阱类似。由于量子点尺寸十分小，自身的电容 $C \sim aF$ 。因此填入一个电子引起的势能变化 e^2/C ，约为 $0.1eV$ ，这个能量已经可以和其分立能级的能量比拟。因此量子点还具有库伦荷电效应。库伦荷电效应本质就是电荷被束缚在量子点中，于是点电荷的库伦场将发生显著的作用。比如在量子点形成的势阱中（实际上是三维势阱），填充第 1 个电子将增加 $e^2/2C$ 势能，而填充第 2 个、第 3 个……势能都将增加 e^2/C 。右图表示考虑了库伦荷电效应之后的量子点能级图。其中虚线为按照类似原子模型解出的能级， E_0 与 E_1 分别为基态和第一激发态。由于库伦荷电效应，第一个填充电子的能级实际上为 $E_0^{(1)}$ ，在 E_0 之上 $e^2/2C$ ；而第二个填充



电子的能级则为 $E_0^{(2)}$ ，在 $E_0^{(1)}$ 之上 e^2/C ；考虑到泡利不相容原理，第三个填充电子的能级 $E_1^{(1)}$ ，在 E_1 之上 e^2/C ……在库伦荷电效应下，各能级简并消除。类似的作用产生了库伦阻塞现象：量子点在填入一个电子后，此电子产生的电势会阻止下一个电子填入，使得回路一次只能通过一个电子。库伦阻塞现象可以由“电极-隧穿结-量子点-隧穿结-电极”结构中表现出的非欧姆 I-V 特性观测到。

低维量子结构材料与物理性质表征

超晶格、量子阱、量子点在半导体领域的研究中发现了许多新现象，为半导体器件的研究提供了新思路、新方向。而且这些结构的制备工艺开辟了“能带工程”这一新领域，使得器件设计制造突破了传统“杂质工程”的局限。

从器件制造与应用的角度看，完美的结构是不存在的，每个器件都会含有杂质和缺陷，它们会对器件的电学、光学特性产生很大影响。通过电学或光学的特性表征，就可以检测出器件的杂质和缺陷情况。尽管电学的性质表征相比光学来说要困难一些，但是它检测样品杂质和缺陷的能力很强。

对于量子阱、量子点等低维量子结构材料的电学性质研究的重要内容就是研究载流子在材料中的输运特性。研究载流子的输运可以得到材料有关的基本物理性质，对新型器件的设计有很大的帮助。对于量子阱异质结结构材料，由于量子限制效应作用在垂直于异质界面方向，所以载流子的纵向输运特性与横向不同。量子点材料在三个方向都会出现量子限制效应，但是仅研究载流子纵向输运时，情况和量

子阱类似。

对于低维量子结构材料的电学性质研究常用到的手段主要是基于电容、电导的测试，有 C-V 特性、导纳谱测试等。C-V 特性测试，可以测量金属-半导体结的半导体一侧中的载流子浓度分布。对于异质结材料，载流子在纵深空间中的分布就可以通过 C-V 特性测试观测到，由此可知一些量子阱的结构信息。导纳谱即 G-T 谱，可以探测半导体 p-n 结或肖特基势垒空间电荷区内的深能级缺陷，得到缺陷态的激活能。对于量子限制效应下的载流子，其分立能级导致的量子化激活能就可以通过导纳谱测试得到。

原理方法

C-V 测试法

金属-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 的作用下会变化。一般来说对于中阻 Si 半导体，Al/n-Si 结反向偏压指的是半导体侧为正极，金属侧接负极，而 Al/p-Si 结则情况相反。当反向直流偏压为 V 时，势垒宽度为 W 。若在 V 上叠加一个高频交变小信号 dV ，则势垒宽度也会产生变化 dW 。此宽度区域内的空间电荷相应的发生微小变化，其行为就像平行板电容充放电一样，电容为：

$$C = \frac{\epsilon A}{W}$$

ϵ 为材料的介电常数， A 为二极管截面积。对于 P 型半导体，其中

载流子浓度分布为 $P(x)$ ，则 dW 区域内电荷变化为：

$$dQ = qAP(x)dW$$

其中 q 为载流子电荷， x 表示界面向半导体侧的纵深距离。由此得到微分电容：

$$C = \frac{dQ}{dV} = qAP(x) \frac{dW}{dV}$$

按照前面类似于平行板电容的表达式可得：

$$W = \varepsilon A / C$$

那么：

$$\frac{dW}{dV} = -\frac{\varepsilon A}{C^2} \frac{dC}{dV}$$

带入微分电容表达式，整理得：

$$P(x) = \frac{C^3}{q\varepsilon A \left(-\frac{dC}{dV}\right)}$$

由于肖特基势垒区随着反向偏压的增大而向半导体内部扩散，因此改变 V 的大小可以得到不同位置 x 处的载流子浓度。由于实际情况中势垒区到电中性区之间不是突变的，所以 $P(x)$ 的测定有一定的分辨极限。 $C-V$ 法测量得到的载流子浓度是 x 处附近 $L_D = [kT\varepsilon/q^2 P(x)]^{1/2}$ 范围内的平均值。显然，温度越低测量的精度越高。

对于量子阱结构，阱外的载流子会首先向阱内转移填充。在势垒区随着反向偏压的增加而扩散到量子阱边缘时，阱外已经完全耗尽；反向偏压进一步增加，阱内载流子将逐渐耗尽。此时电容随偏压的变化由量子阱内载流子浓度随偏压的变化决定。量子阱可以想象成一个

载流子浓度很高的导体薄板，此时的电容就像金属层和量子阱层夹住半导体覆盖层而成的平行板电容一样，由覆盖层厚度、介电常数决定，故 C 随 V 变化十分迟缓， C - V 曲线出现平台。

C - V 曲线平台是量子阱结构的典型特征。平台的位置主要由覆盖层厚度、覆盖层参杂浓度决定；平台宽度主要由量子阱的深度、量子阱参杂浓度和覆盖层厚度决定。当然，温度对 C - V 曲线也有很大影响。对于多量子阱，不难想象在条件合适的时候会出现多平台。覆盖层厚度很小或者参杂浓度很低时，也许在零偏压时势垒区已经把量子阱包含在内。此时加负向偏压将得不到 C - V 平台，无法探测到量子阱的信息，但是加正向偏压使势垒区退回到量子阱外则是一种解决方法。覆盖层厚度很大或者参杂浓度很高时，也许会因为势垒扩散到量子阱处时电容太小，无法观测到清楚的 C - V 平台。量子阱的深度越小，量子阱参杂浓度越小，或者覆盖层厚度越小，量子阱中的载流子就越容易耗尽， C - V 平台宽度就越短。 C - V 测试除了可以计算获得载流子浓度分布信息之外，也能定性分析量子阱结构的一些信息。

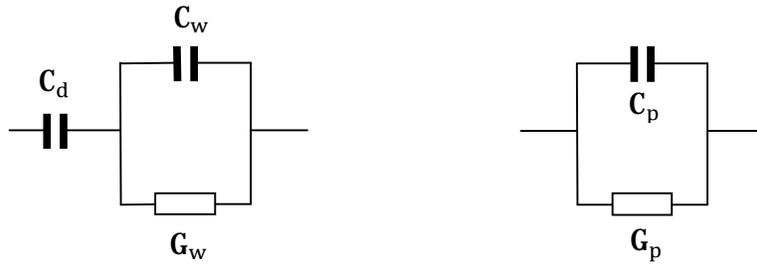
导纳谱测量法

导纳谱测量方法很早就被提出，当时用于半导体 PN 结或肖特基势垒空间电荷区内深能级缺陷的测量研究。后来发展了导纳谱测量异质结材料能带偏移（带阶，band offset）的方法。利用此方法可以测量量子阱结构的激活能。由激活能 E_a 和费米能级 E_f 位置就可以得到量子阱的带阶。以空穴阱样品为例，价带带阶为：

$$\Delta E_V = E_a - (E_f - E_V)$$

导纳谱测试采用的量子阱样品都在正面制成肖特基电极，衬底面制成欧姆电极。利用等效电路或载流子热发射模型都可以解析导纳谱。

在等效电路模型中，肖特基势垒的耗尽层电容为 C_d ，量子阱的电容、电导分别为 C_w 、 G_w 。如下图，左边为样品的等效电路，右边为等效的测试电路。



其中量子阱电导可以表示为：

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

α 是一个与温度无关的常量。

等效测试电路为电容 C_p 与电导 G_p 的并联，这也是实验中直接测量得到的。由电路等效变换可以直接得到：

$$C_p = \frac{\omega^2 C_w C_d (C_w + C_d) + G_w^2 C_d}{G_w^2 + \omega^2 (C_w + C_d)^2}$$

$$G_p = \frac{\omega^2 G_w C_d^2}{G_w^2 + \omega^2 (C_w + C_d)^2}$$

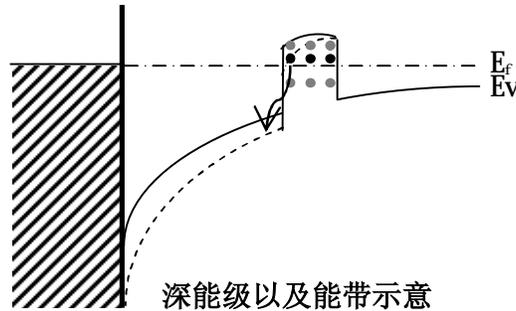
ω 为测量 C_p 、 G_p 时使用的交流小信号圆频率。由于 G_w 与温度有关， C_p 与 G_p 都将随温度变化。在温度升高的过程中，电容 C_p 会出现一个升高的台阶，电导 G_p 则会从零升高到一个峰值，最后降为零。 G_p 在 T_m 温度时达到峰值，则 T_m 与交流测试小信号频率满足关系：

$$f = \frac{\alpha T_m}{2\pi(C_w + C_d)} \cdot e^{-\frac{E_a}{kT_m}}$$

在得到了多个频率 f 测试的导纳峰温度 T_m 之后，根据上式可以将 $\ln \frac{f}{T_m}$ 对 $\frac{1}{T_m}$ 作线性拟合，其斜率即可推出激活能 E_a 。这就是多频测试法。

若考虑到在 T_m 附近， G_p 的变化主要是 G_w 决定的， C_w 和 C_d 随温度的变化可以忽略，将 C_w 和 C_d 的值代入 G_p 表达式，解出 G_w 。在 T_m 附近取若干数据，根据 G_w 表达式将 $\ln \frac{G_w}{T}$ 对 $\frac{1}{T}$ 作线性拟合，其斜率即可推出激活能 E_a 。这就是单频测试法。

载流子热发射模型的物理过程是：在交变小电压信号作用下，样品势垒区的能带随之变化，这将引起势垒区边缘的缺陷深能级与半导体导带或价带之间载流子的发射与俘获。对于量子阱结构样品，势阱内的分立能级就相当于这里的缺陷深能级，原理类似，如下图所示，短虚线为变化的价带。



随着电压信号的变化，单位时间量子阱内的载流子数目发生的变化就是样品的电导。在交变小信号圆频率为 ω 时，令势阱中电荷变化满足 $dQ = \beta dV$ 。那么量子阱电容 C_w 、电导 G_w 可以表示为：

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

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

其中 e_p 为空穴发射率，可以表示为：

$$e_p = \alpha_2 T^{1/2} \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

α_2 是一个与温度无关的常量，使用角标 2 是为了与前面等效电路模型中的 α 区别。

样品总的电容为肖特基势垒电容和量子阱电容并联：

$$C = C_w + C_0$$

忽略样品其它的缺陷深能级，肖特基势垒漏电流较小时，样品的总电导就是量子阱的电导：

$$G = G_w$$

由于 C_w 和 G_w 中的 e_p 随温度变化，电容 C 在温度升高过程中出现一个升高的台阶，电导 G 则会从零升高到一个峰值，最后降为零。由于

$$\lim_{T \rightarrow \infty} C_w - \lim_{T \rightarrow 0} C_w = \lim_{e_p \rightarrow \infty} C_w - \lim_{e_p \rightarrow 0} C_w = \beta$$

故 C 在高温和低温情况相差 β 。

G 在 T_m 温度时达到峰值 $G_{\max} = \frac{\beta\omega}{2}$ ，此时 $e_p = \omega = 2\pi f$ ，交变测试小信号频率与 T_m 满足关系：

$$f = \frac{\alpha_2 T_m^{1/2}}{2\pi} \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

在得到了多个频率 f 测试的导纳谱之后，根据上式可以将 $\ln \frac{f}{T_m^{1/2}}$ 对 $\frac{1}{T_m}$ 作线性拟合，其斜率即可推出激活能 E_a 。这就是多频测试法。

由之前得到的 G 与 G_w 关系， G_{\max} 与 β 关系，还有在 T_m 温度下 e_p 与 ω 关系，代入 G_w 表达式可以解出：

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

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，得到若干温度 T 下的 e_p 。根据 e_p 表达式将 $\ln \frac{e_p}{T^{1/2}}$ 对 $\frac{1}{T}$ 作线性拟合，由其斜率可推出激活能 E_a 。这就是单频测试法。

样品结构与测量条件

对于多量子阱，前面已经讨论过：如果势阱的间距较大，各势阱没有耦合，可以看作一些量子限制效应明显的单阱依次排列；如果势阱的距离很小，波函数严重重叠，各势阱相互耦合，此时材料的量子限制效应减弱。那么多量子阱只有在间距不是太小时才能在测量中分辨多个量子阱的现象：在 $C-V$ 曲线中可以看到多平台，在导纳谱中可以看到多个峰。导纳谱的不同峰对应不同的势阱能级的载流子发射与俘获。

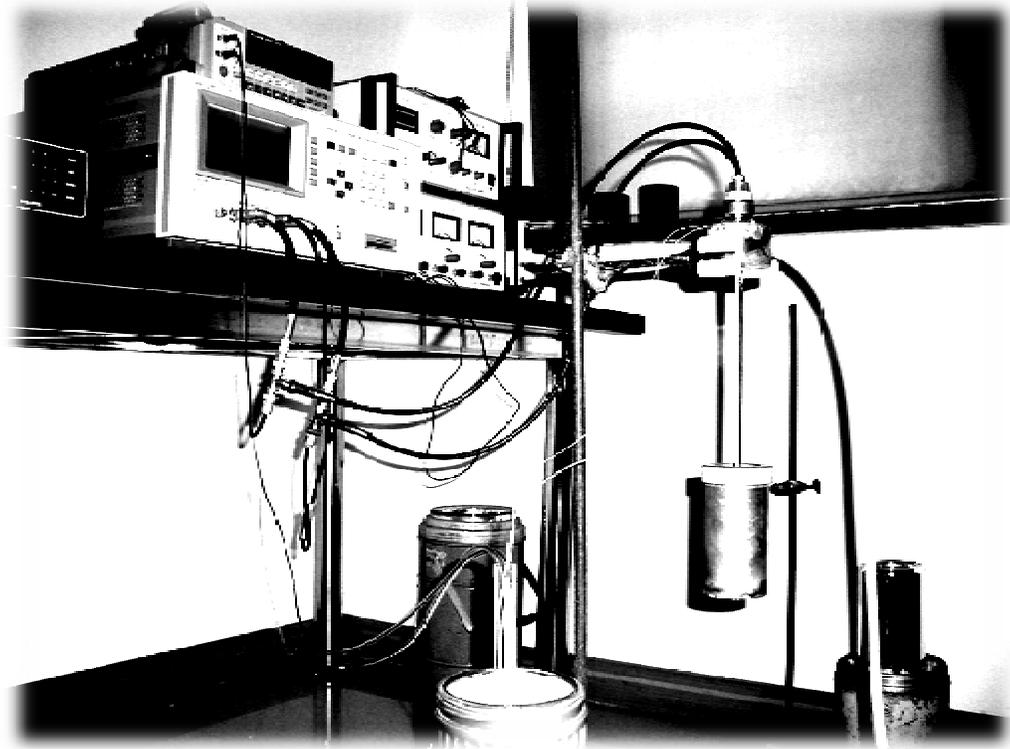
量子点结构在纵向仍然对载流子有量子阱类似的量子限制效应，因此采用同样的测试方法时，与量子阱有类似的规律与结论。

测量时加上的直流偏压可以引起势垒区边界的移动，而改变量子阱内的载流子浓度。但是量子阱的电导是由其中载流子浓度的变化率决定的，而与浓度的绝对值无直接关系。但是当直流偏压过大可能使势垒区扩散到了样品衬底中，这时量子阱及其周围部分都完全耗尽，显然不可能表现出交流电导性质。这种情况下， $C-V$ 曲线会表现出电容迅速下降。

仪器装置

本实验采用特别设计定制的铜质样品架装置，利用液氮作为低温

源使样品温度能降低到液氮沸点附近，然后令其自然升温。升温温度在一定范围内缓慢变化的过程中，利用安装了基于 GPIB 的控制卡和相应控制程序的计算机同时记录下热电偶测量到的温度（电压信号）和 LCR 表测量到的电导值就可以得到导纳谱。热电偶采用铜-康铜热电偶，由有 5½位分辨显示的数字万用表测得热电偶电压信号，并且也通过 GPIB 发送结果给计算机。在恒定温度下，也可以通过此系统直接扫描样品的 C-V 曲线。



导纳谱谱图可以在测量时通过控制程序的一个窗口看到，也可以“.dat”的数据文件（ASCII 码）形式保存。此数据文件可以用 Windows 记事本或写字板查看，也可以直接导入 Origin 或者 Excel 程序进行作图、拟合等分析处理。

测量仪器装置系统的组成结构和使用详情可以参考《导纳谱测量

系统使用说明》。

样品参数

本实验测量的样品一般是基于 P 型中阻硅衬底的半导体量子阱或者量子点样品，有单层的也有多层的。它们都是用分子束外延 (MBE) 的方法制备的，因此薄膜材料的组分、厚度等数据能够较精确的控制。本实验的样品衬底面镀一整块铝质欧姆电极，表面镀上若干小圆点形的铝质肖特基电极，表面外观如右图。



本实验室可以提供以下样品：

9710 (三层量子点)

Si	3200Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
		Ge 13Å
Si	450Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
		Ge 13Å
Si	450Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
		Ge 13Å
Si	900Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
Si Substrate		

9711 (三层量子点)

Si	3200Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
		Ge 17Å
Si	450Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
		Ge 17Å
Si	450Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
		Ge 17Å
Si	900Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
Si Substrate		

9712 (单层量子阱)

Si	2500Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$	100Å	$B^+ : 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
Si	1700Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
Si Substrate		

9713 (三层量子阱)

Si	2500Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$	100Å	$B^+ : 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Si	500Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$	100Å	$B^+ : 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Si	500Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
$\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$	100Å	$B^+ : 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
Si	2500Å	$B^+ : 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$
Si Substrate		

实验内容

实验系统准备

准备好足量液氮和冰，检查氮气是否充足。液氮可以凭票在科学楼北面换取，实验室有杜瓦容器；冰在实验室内冰箱常备；氮气在化学西楼北面化学药品仓库购买。

准备好冰水混合物置于保温桶中。将样品架固定在铁架台上，装有热电偶冷端的试管浸入冰水混合物中，打开数字万用表和 LCR 表预热。样品架在铁架台上平时是下垂姿态，如果需要装卸样品，可以在取下黄铜杯之后直接将样品架转动到朝上的姿态，工作完成之后应立即恢复样品架姿态。

将黄铜杯取下，待装样品。如果环境潮湿可以先用电吹风吹拂样

品架冷头附近,注意电吹风不要太靠近,以免温度过高加速粘胶老化。打开电脑,运行实验测量控制程序,确定测量系统进入正常工作状态。实验时要保证样品架处于阴凉处,周围环境气流稳定。因此应关闭样品架附近的门窗,并拉下窗帘。

研究样品的 C-V 特性

- ◆测量比较量子阱及量子点样品的 C-V 曲线
- ◆测量比较使用不同频率测试信号的样品 C-V 曲线
- ◆测量比较不同温度下样品的 C-V 曲线
- ◆通过解泊松方程模拟计算样品的 C-V 曲线
- ◆通过样品的 C-V 数据模拟计算样品中载流子浓度分布

首先可以以正负 3 伏作为偏压扫描范围,然后根据情况确定更合适的偏压扫描范围。通过设置扫描步长和数据采集次数可以实现“快速略扫”和“慢速精扫”。每次测试应该记录下测试点的位置,推荐画图记录。测试完成后可以换一个点测试,看结果是否重复。

由于样品电容绝对值较小,一般选择较高的交流测试信号频率,本实验系统的 LCR 表最高支持 1MHz。可以选择不同频率的交流测试信号来测量,看有什么现象。同样的,还可以改变温度、交流测试信号的幅度等参数来做 C-V 测试。

模拟计算样品的 C-V 曲线主要通过解势垒区耗尽近似下泊松方程来进行。详细方法可以搜索查阅文献资料。

研究样品的导纳谱

- ◆测量量子阱及量子点样品的导纳谱

◆测量比较不同直流偏压下的样品导纳谱

◆观测量子点的库伦荷电效应

◆模拟计算样品的导纳谱

由于导纳谱测量耗时比较长，可以设置多个频率同次测量。这样一次升温就可以得到 5 到 8 条导纳谱，便于多频测试分析，用于单频测试分析也可以减小实验误差。测量频率越高越好，最低一般不要低于 50kHz。液氮可以让样品冷却到其沸点附近的低温，事实上一般样品的导纳峰出现在 100K 到 200K 之间。所以在摸清样品性质之后，为了节约时间，降温到 90K 左右即可。如果测量开始发现图谱噪声过于夸张，应该果断停止测量，让样品温度回升，然后检查电极接触是否紧密，该测试点是否磨损严重。

通过 C-V 测试可以估计使势垒区边界的移动到量子阱边缘的直流偏压可以。在此电压附近的导纳谱测量结果会有很大区别。

对于量子点样品，改变直流偏压的大小，可能得到若干分立的激活能，而它们之间可能表现出一些确定的能量间隔，可以由库伦荷电效应解释。

模拟计算样品的导纳谱主要根据载流子热发射模型，通过实验得到一些必要参数，然后由电导的表达式直接得到导纳谱。详细方法可以搜索查阅文献资料。

分析实验测量系统的不足与缺陷

◆研究测量电路中接触电阻、分布电容的影响

◆估计热电偶系统测量温度的误差和对激活能测量结果的误差

◆研究 GPIB 系统的硬件、程序对实验测量的影响

由于测量电路中不可避免的有残余接触电阻与分布电容，本实验要求分辨十分微小的电容，这些因素可能会有一些影响。而且在测量电路的接触电阻与分布电容不稳定的情况下，比如轻微扰动会带来这些参数的剧烈变化，对实验测量可能有很大影响。

热电偶系统的温度结果由电压信号转换而来。在理想情况下，转换的公式可以通过热电偶的标准标度拟合得到，详情可参考《导纳谱测量系统使用说明》。而实际问题中，热电偶的标度也有可能因每个热电偶而异。本实验测量系统的热电偶系统可靠度到底如何，这是一个重要的问题。

本实验测量仪器与计算机的连接使用 GPIB 系统。虽然 GPIB 是一个通用性很强的科学仪器总线系统，但其性能还是因各环节的硬件、软件状况而异。本实验系统控制程序是否处于最佳工作状态，其控制通讯、数据传输、处理记录等方面是否存在影响实验测量的问题？

思考讨论

- ★为什么量子点与量子阱有类似的 C-V 特性和导纳谱？
- ★如何判断确定 Al/n-Si 结与 Al/p-Si 结的反偏方向？
- ★为什么实际的 C-V 曲线和导纳谱不是“原理方法”部分描述的形状？
(CV 从一个值阶跃到另一个值，导纳谱从零到峰值由归为零)
- ★利用载流子热发射模型使用单频测试法是不是可以取遍整条导纳谱的数据？

- ★实验中液氮使样品降温，电脑显示的温度最低能到多少，这是什么原因？（液氮在常压下的沸点约为 77K）
- ★为什么测量导纳谱要采取自然升温？测量时如果升温太快会有什么问题？
- ★量子点尺寸十分微小，直径可能只有数十纳米，为什么本实验可以测量量子点的性质？（样品中量子点大小不均匀会出现什么结果）
- ★如何能够准确确定导纳峰的位置和峰值？
- ★如何解释不同频率下导纳峰的位置和高度？
- ★直流偏压的大小和方向对导纳谱的测量结果有什么影响？
- ★测试交流信号的幅度太大会出现什么问题？
- ★等效电路模型和载流子热发射模型有什么区别？用于处理导纳谱数据得到的结果有什么不同？
- ★C-V 法能否测量非金属-半导体二极管，比如线性缓变 PN 结的载流子浓度分布？
- ★升温的速度对导纳谱实验测量有什么影响？升温速度控制在什么大小最合适？（太快不准，太慢费时）
- ★在仪器允许的范围内，测量导纳谱使用什么频率最好？
- ★为什么多量子阱可能出现双导纳峰？什么情况会出现？
- ★阱宽不同的量子阱的导纳谱有什么区别？
- ★是不是测试时取得平均值次数越多越好？
- ★样品表面二氧化硅层对样品的性质有什么影响？（氧化层一般在样品取出 MBE 预室后马上形成，镀电极之前无法除去样品正面的氧化物）

参考文献

- 盛箴, 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.
- 戴道宣, 戴乐山. 近代物理实验 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- 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.
- 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)
- C. Miesner, et al., Capacitance-voltage and admittance spectroscopy of self-assembled Ge islands in Si, Appl. Phys. Lett. 77, 2704 (2000)
- S. K. Zhang, et al., Coulomb Charging Effect in Self-Assembled Ge Quantum Dots Studied by Admittance Spectroscopy, Phys. Rev. Lett. 80, 3340 (1998)