

图 5-16 封闭系统中假设的不同的量子效应影响对应的不同的平衡状态。(a) 为没有量子效应参与（经典情况）下的状态，(b)-(d) 为有量子效应参与的情况。图中边缘的白色区域表示生长层，中间的深色（红色）表示原始岛的偶数层区域，而中间的浅色（蓝色）表示原始的奇数层区域。

形生长前沿，如图中的 (b) 和 (c) 所示；而当量子效应可以驱动生长时，系统将保持条纹状生长模式，此时的平衡状态应为图中 (d) 所示。下面我们比较不同状态下系统的总能量时，假设条纹状的生长前沿（衬底台面的宽度假设 a ）为圆弧形是合理的，如图 5-17 所示。根据不同状态的几何结构我们得出系统的总能

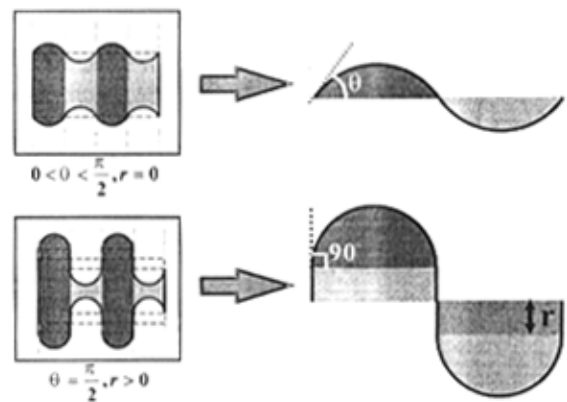


图 5-17 假设条纹状模式的生长前沿是圆弧形，可以用参数 θ 和 r 来表示。深色（红色）表示原始的偶数层，浅色（蓝色）表示原始的奇数层区域。

量由公式 5-6 所示。

$$E(\theta, r) = \begin{cases} 2\lambda_s \cdot L, & \theta = 0, r = 0 \\ 2\lambda_s \cdot L \cdot \frac{\theta}{\sin \theta} - \frac{\Delta E_Q}{2} \cdot L \cdot a \left[\frac{\theta}{\sin^2 \theta} - \cot \theta \right], & \theta < \frac{\pi}{2}, r = 0 \\ 2\lambda_s \cdot \frac{L}{a} (2r + \frac{\pi}{2}a) - 2\Delta E_Q \cdot L (r + \frac{\pi}{8} \cdot a), & \theta = \frac{\pi}{2}, r > 0 \end{cases} \quad (5-6)$$

其中 $E(\theta, r)$ 为系统的总能量, θ 为生长前沿的圆弧角度, r 为条纹的长度。 λ_s 为台阶自由能, a 为衬底台面的宽度。 ΔE_Q 为相邻的奇偶层之间的电子能量的平均差值, L 为生长前沿的总长度。

我们定义特征函数

$$F(\theta, a, \Delta E_Q) \equiv \frac{\Delta E_Q \cdot a}{4\lambda_s}$$

则系统的总能量可以写成公式 5-7 所示。

$$E(\theta, r) = \begin{cases} 2\lambda_s \cdot L, & \theta = 0, r = 0 \\ 2\lambda_s \cdot L \cdot \frac{\theta}{\sin \theta} - 2\lambda_s \cdot F(\theta, a, \Delta E_Q) \cdot L \left[\frac{\theta}{\sin^2 \theta} - \cot \theta \right], & \theta < \frac{\pi}{2}, r = 0 \\ E(\theta = \frac{\pi}{2}, r = 0) + (4\frac{\lambda_s}{a} - \Delta E_Q)L \cdot r, & \theta = \frac{\pi}{2}, r > 0 \end{cases} \quad (5-7)$$

图 5-18 画出总能量随参数 θ 和 r 的变化关系。从图中可以清楚的看出, $F(\theta, a, \Delta E_Q) = 0.5$ 处于临界状态。当 $F(\theta, a, \Delta E_Q) < 0.5$ 时, 能量极小值在 $\theta < \pi/2$ 的某个位置, 也就是量子效应不够明显, 不能驱动条纹状生长。生长前沿保持近似的环形, 即经典生长模式; 当 $F(\theta, a, \Delta E_Q) > 0.5$ 时, 系统的能量随着 θ 和 r 的增加而递减, 最终条纹状结构更稳定。这时系统处于量子尺度下的“单摆”生长模式, 量子效应可以驱动选择性的条纹状生长。相应的临界条件为 $\Delta E_Q \cdot a \sim 4\lambda_s$ 。

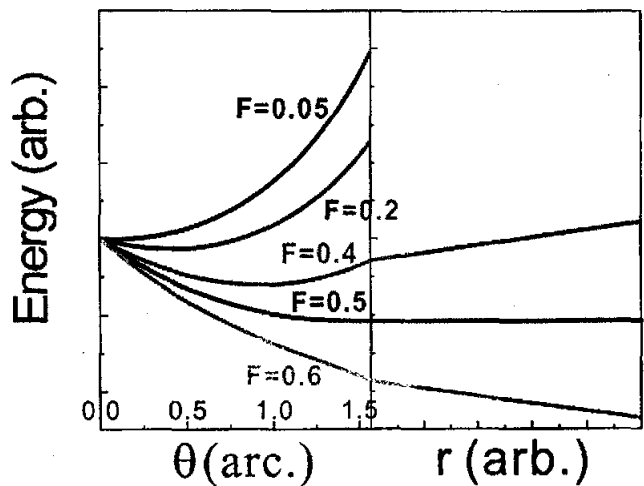


图 5-18 封闭系统中的总能量随 θ 和 r 的变化关系。特征函数 $F(\theta, a, \Delta E_Q)$ 作为参数来表示量子效应的作用。

2. 开放系统的分析

现在来讨论系统的总能量随覆盖度的变化，为方便起见，把经典模式和量子模式进行对比分析，两者的示意结构如图 5-19 所示。与上面近似相同，这里

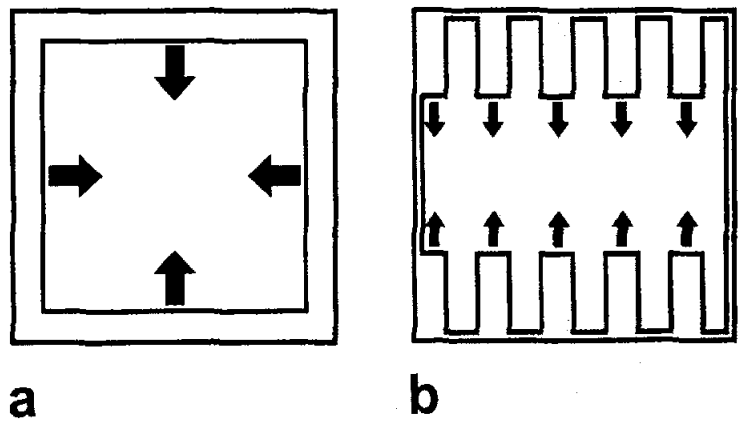


图 5-19 开放系统的经典生长模式与量子生长模式的结构示意图。假设 Pb 岛为边长为 L 的正方形。其中 (a) 为经典模式，(b) 为量子条纹生长模式。图中的深色（红色）箭头表示生长方向。

假设 Pb 岛的形状为正方形（边长假设为 L ），生长前沿也为正方形且距离岛的

四个边的距离相等。在经典模式下, 如图 5-19(a) 所示, 总能量可以表示成

$$E(\Theta) = 4\lambda \cdot \sqrt{L^2 - \Theta} + \Theta E_C \quad (5-8)$$

在量子模式下, 如图 5-19(a) 所示, 系统的总能量可以表示成

$$E(\Theta) = \begin{cases} \Theta \left[-E_Q + E_C + 2\frac{N-2}{L}\lambda_S \right] + 4L \cdot \lambda_S, & \Theta < \frac{L^2}{2} \\ \Theta \left[E_Q + E_C - 2\frac{N}{L}\lambda_S \right] - L^2 \left[E_Q - 2\frac{N}{L}\lambda \right] + L\lambda, & \Theta > \frac{L^2}{2} \end{cases} \quad (5-9)$$

其中 $E(\Theta)$ 为生长层的总能量, Θ 为生长层的覆盖度。 E_C 是每单位面积上的平均表面能 (不考虑量子能量), E_Q 是由奇偶层的量子阱态调治而引入的每单位面积上的平均量子能量。 λ_S 是单位长度的台阶能量。 L 是 Pb 岛的边长, N 是 Pb 岛跨越的总的台阶数目。为了讨论方便, 我们定义特征函数

$$G(E_Q, L/N) \equiv E_Q - 2\frac{\lambda_S}{(L/N)}$$

来表示量子效应与台阶效应的差值。

图 5-20 所示为总能量随覆盖度变化的示意图, 显示了量子效应与台阶作用的竞争关系。

图中对应于生长模式 5-19(a) 的曲线在图中标记为 “Classical curve”。另外两条折线是对应于生长模式 5-19(b) 的曲线, 上边的一条对应于 $G(E_Q, L/N) = 0$, 下边的一条对应于 $G(E_Q, L/N) = -E_C$ 。当 $0 < G(E_Q, L/N) < -E_C$ 时, 如图中 “II” 所示区域 (在这里我们为了讨论方便, 已经假设了 $E_Q > -E_C$, 否则应该是 $0 < G(E_Q, L/N) < E_Q$), 量子效应比台阶作用显著, 类似 “单摆” 的动力学过程——选择性条纹状生长+台阶生长——在能量上更稳定; 当 $G(E_Q, L/N) < 0$ 时, 如图中 “III” 所标记的区域, 量子效应没有台阶作用显著, 经典的环状生长模式将被激发 (Classical Curve)。曲线 $G(E_Q, L/N) = 0$ 则定义了从量子条纹状生长向经典环状生长的转变点, 也就是 $E_Q = 2\frac{\lambda_S}{(L/N)}$ 。

当 $G(E_Q, L/N) > -E_C$ 时, 台阶的作用已经非常小, 只有量子效应驱动的选择形条纹状生长可以被激发 (“I” 所标记的区域), 而台阶生长则是被禁止的 (“IV” 所标记的区域)。这种情况下的最终状态将是条纹状的形貌。我们在实现上没有观察到类似的情况, 主要原因是室温下很难得到量子效应足够强 (厚度足够薄) 的 Pb 岛。

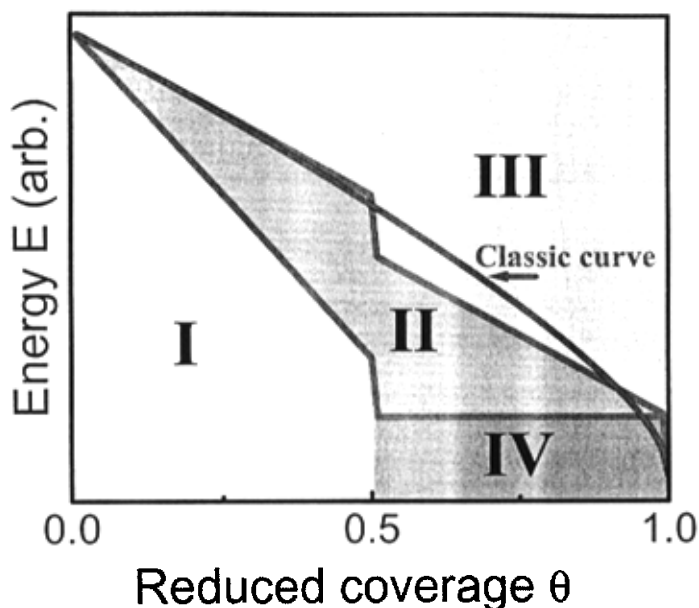


图 5-20 总能量随简约覆盖度变化的示意图。简约覆盖度 $\theta = \Theta/L^2$ ，对应于生长模式 5-19(a) 的曲线在图中标记为“Classical curve”，另外两条曲线是对应于生长模式 5-19(b) 的曲线。

理论上已经定量计算过 Pb(111) 面上的台阶能量为大约 $78 \text{ meV}/\text{\AA}$ [143–145]。在这里假设衬底台阶的宽度为大约 $500 \text{ \AA}$ ，则我们可以估计出发生量子经典转变的量子能量大约为 $0.005 \text{ eV}/\text{Unit Cell}$ 。C. M. Wei 和 M. Y. Chou 从理论上讨论了量子尺寸效应对 Pb(111) 面的表面能的影响，如图 5-21 所示[146]。根据 Wei 和 Chou 的计算结果，我们得出临界厚度在大约 13-14 单层，与我们实验上看到的临界厚度（24 单层）吻合的比较好。

5.3 Pb 岛的多层生长研究

利用 STM 除了可以精确控制上一节所述的单层生长之外，通过增加偏压脉冲的幅度，还可以控制大幅度的生长，即同时触发很多层的生长。这种过程伴随着更激烈的原子迁移。图 5-22 所示为施加一个大约 10 V 的脉冲偏压导致的 Pb 岛发生强烈的形貌变化，沿着图中直线的剖面高度 Profile 随时间的变化示于图 5-23 中。原始的 Pb 岛的剖面高度 Profile 在图 5-23 中被标记为“Original”。外加脉冲偏压后的同一位置的剖面高度 Profile 分别用彩色线显示于图中。从图中可以看出， 10 V 左右的脉冲导致了大约 12 nm （ ~ 35 单层）的

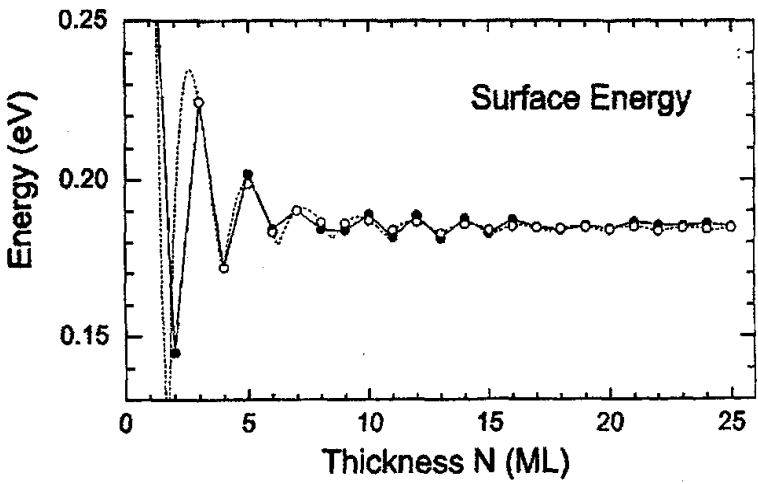


图 5-21 C. M. Wei 和 M. Y. Chou 计算的量子尺寸效应对 Pb(111) 薄膜的表面能的周期性调制。

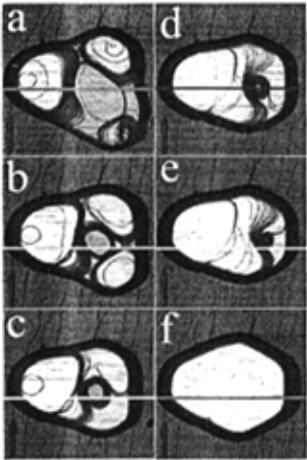


图 5-22 利用 STM 大幅度操纵 Pb 岛的生长。扫描面积为 $750\text{ nm} \times 750\text{ nm}$ 。外加一个大约 10 V 偏压脉冲后恢复扫描。以图 (a) 为时间参考点。(b)–(f) 的时间分别为 4 分钟, 8 分钟, 12 分钟, 15 分钟和 19 分钟。原始的 Pb 岛的形貌为具有原子级平面顶部的楔形结构, 其形貌未在图中给出

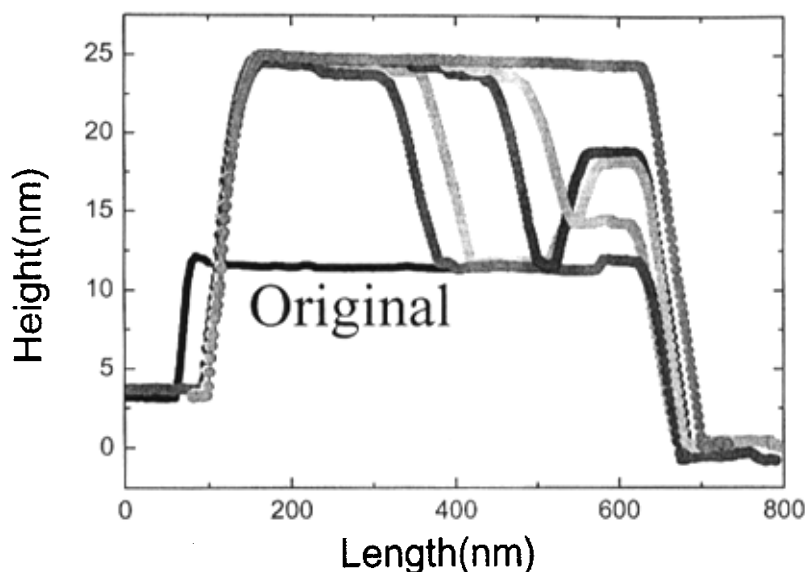


图 5-23 对应于图 5-22 中的直线处的线扫描随时间的变化。其中原始的未处理的岛的线扫描在图中用“Original”标出。剩下的曲线分别是为 0 分钟，4 分钟，12 分钟，15 分钟和 19 分钟时的线扫描曲线分别对应于图 5-22 中的 (a), (b), (d), (e) 和 (f)。

Pb 岛同时生长，并且从岛的周围开始生长直到整个岛的顶部恢复为平面。Pb 岛受到脉冲触发之后，由平面顶部马上变为起伏的顶部，并开始自发的生长。在初始阶段倾向于高度生长，即 Pb 岛在具有表面台阶的位置处快速的吸收外来原子并长高，直到形成顶部平面或者在岛的周围形成闭合的环状形貌，然后转为慢速生长。图 5-22 中的 $t = 19$ 分钟之后的生长为慢速生长，或者如图 5-13 和 5-14 中所示的慢速生长为形成闭合圆环之后的慢速生长。

为解释 STM 偏压脉冲在 Pb 岛的自发再生长中的作用，我们讨论如下几种物理机制。

STM 脉冲改变动力学势垒： 从前面的实验分析中，我们得出结论：Pb 岛的受触发再生长总是优先于在岛边发生。当岛边有台阶存在时，总是以大于正常情况一个数量级左右的速度完成快速生长，一旦受触发的 Pb 恢复了顶面平面的形貌，或者甚至在岛边形成闭合结构之后，生长速度会突然下降，这种奇怪的现象在图 5-14 会很明显的看出。由此我们断定，原子扩散过程中在岛边处受到的面间扩散势垒起了重要的作用 [147-151]。

我们知道,在晶体材料中,由于晶格的周期性导致表面能依赖于晶面的取向,不同的晶面由于取向的不同而具有不同的表面能 [152-154]。晶体的平衡状态应该是各个晶面的表面能总和最小——与晶向和该晶面的面积大小都有关系。Wulff 准则 (Wulff construction) 很好的描述了平衡状态下的晶体形状:从晶体中心到晶面的距离正比例于该面的单位面积上的表面能大小,

$$R_i = (\text{constant})\gamma_i \quad (5-10)$$

其中 γ_i 是晶面 i 上的单位面积的表面能 (Surface Tension), R_i 是晶面 i 到晶体中心的距离。从公式中可以看出低能量的表面平衡时具有较大的面积,而高能量的表面具有较小的面积。在 Si(111) 衬底上蒸镀 Pb 的楔形岛状结构,顶面是 (111) 面,原子从 Wetting layer 或者从侧面向岛的顶面迁移时需要受到岛边由侧面向顶面的扩散势垒的阻碍 [155, 156],从而阻碍 Pb 岛向平衡状态弛豫。通常经过 MBE 蒸镀几个单层的 Pb 之后形成的 Pb 岛具有几个纳米的高度,而横向尺度则可以达到几十个纳米甚至几百个纳米,比例在 10 倍到 100 倍之间。如果不考虑界面的影响,这种结构显然是远离平衡状态的,这也就是说在所谓的“准平衡”状态时,Pb 岛的各个晶面面积的比例 (10 ~ 100) 是由动力学因素导致的结果。当在岛边外加一个相对较大的脉冲偏压时,由于瞬间的失稳会破坏局域的岛边跃迁势垒,使得 Pb 原子在破缺处大量涌向顶面。随着对跃迁势垒的破坏程度不同,会造成不同幅度的自发再生长。随着受触发 Pb 岛向平衡状态弛豫,相应的能量也会降低,其它岛上的原子将由化学势高的区域向化学势低的区域扩散。为验证这种 STM 触发而造成的局域跃迁势垒改变,我们还进行了非接触模式的原子力显微镜扫描,如图 5-24 所示。我们发现,在扫描的过程中很容易触发 Pb 原子的逐层生长。由于原子力显微镜扫描更容易与表面相互作用从而导致的跃迁势垒的调制,从而出现了图 5-24 中的生长现象。在岛边存在台阶交叉时,原子从交叉处向上扩散也可以绕过跃迁势垒,所以我们会看到沿着岛边的快速生长。

STM 电场极化形核: 电中性的粒子在电场中由于偶极相互作用易于向高电场区域运动 [138]。当利用 STM 在 Pb 岛边的某一确定位置施加脉冲时,由于针尖与岛边地区的几何结构而在脉冲位置形成局部高电场区,促使衬底

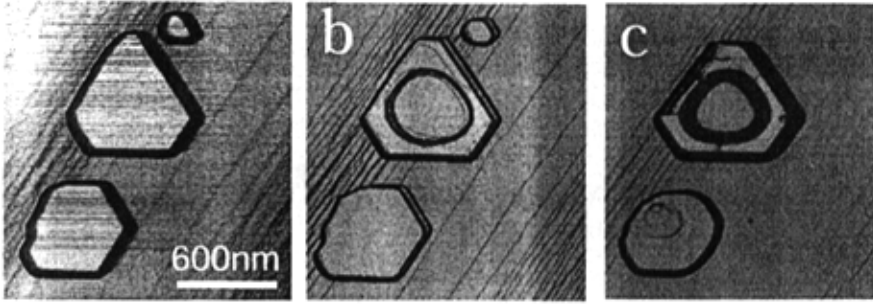


图 5-24 NC-AFM 像。(a) 为 $t=0$ 时刻；(b) 为 $t=4$ 小时；(c) 为 $t=8$ 小时。

表面上的自由 Pb 原子将趋向于向针尖所在的位置运动。结果会造成局域的自由 Pb 原子浓度升高，一旦达到过饱和状态时（对应于临界形核尺寸 Pb 原子浓度），则会有稳定的 Pb 的生长核析出，并开始生长以降低系统能量 [157]。直到恢复初始状态时的顶部平面形貌时，STM 电场诱导的形核完成了生长。在不破坏跃迁势垒的前提下，通过适当的电场可以诱导原子的定向运动，并造成局域过饱和从而也可以形成小幅度生长（例如前面介绍的单层生长）。

库仑充电放电机理：假设 Pb 岛与 Si 衬底构成一个电容系统，当外加一个偏压脉冲时，会导致电容系统的瞬间充电，然后通过衬底进行放电。如果把 Pb 楔形岛当作电容来考虑，它的能量 $E = Q^2/(2C)$ ，电容可以表示成 $C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(R_g/R)}h$ ，其中 h 为 Pb 岛的高度， R 为 Pb 岛的半径， R_g 为衬底接地端的有效半径。则

$$E = \frac{\ln(R_g/R)}{4\pi\epsilon} \frac{Q^2}{h} \quad (5-11)$$

岛的高度或者半径的增加会导致能量的下降。我们定义

$$\mu_h = \Omega \frac{dE}{dV} \Big|_{R=\text{const}} = -\Omega \frac{\ln(R_g/R)}{4\pi^2\epsilon R^2} \frac{Q^2}{h^2} \quad (5-12)$$

$$\mu_R = \Omega \frac{dE}{dV} \Big|_{h=\text{const}} = -\Omega \frac{1}{8\pi^2\epsilon R^2} \frac{Q^2}{h^2} \quad (5-13)$$

由于 $R_g \gg R$ ，所以充电的 Pb 岛更愿意向高度方向生长。利用电容充电和放电的机制也能解释类似的生长现象。

5.4 纳米结构的构建

由上面的分析可以知道，这种 STM 诱导的自发再生长过程不仅可以精确的

控制层数, 还能实现大尺度的原子迁移, 迁移距离超过几个微米。我们利用这种方法还成功地构造了特定形状的大尺度纳米结构以及纳米结构阵列。

图 5-25 所示的是在一个 Pb 岛上定点进行脉冲处理而得到的纳米阱结构。图中 (a) 为原始未处理的岛的 STM 形貌, 高度在 4 纳米左右; (b) 为分别在岛边缘和中心位置进行脉冲处理得到的大约 8 纳米高的阱形结构; (c) 为继续进行脉冲处理而得到的大约 11 纳米高的阱形结构。

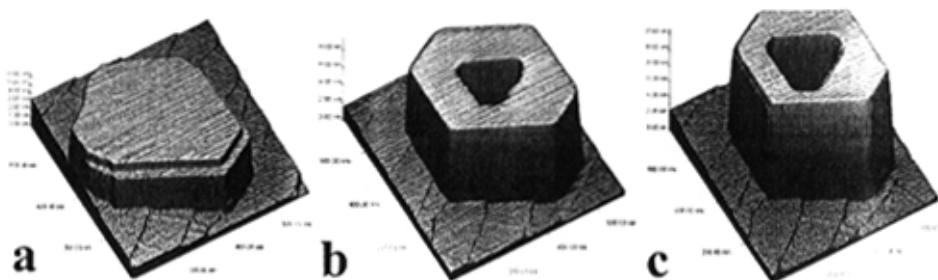


图 5-25 利用 STM 在同一个岛上进行操纵而得到的特定形状的纳米结构。(a) 为原始未处理的岛, 高度大约是 4 纳米; (b) 为利用脉冲在岛边和中间位置进行处理得到的阱形结构, 高度大约是 8 纳米; (c) 为继续操纵得到的类似形状的阱形结构, 高度大约是 11 纳米。扫描面积为 $700\text{ nm} \times 700\text{ nm}$ 。

图 5-26 是利用原子的大尺度迁移进行的纳米结构阵列操纵。图 (a) 是直接

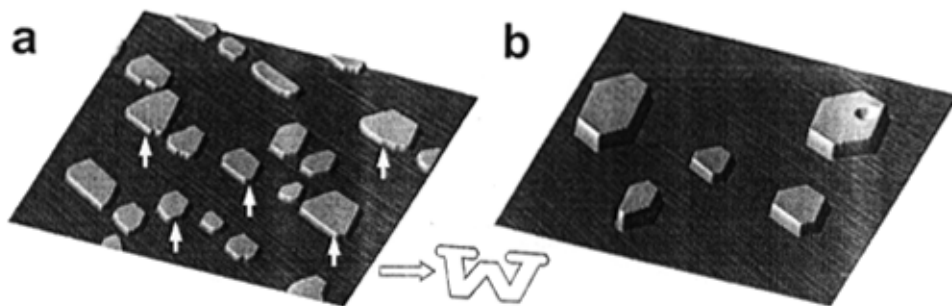


图 5-26 利用 STM 构造纳米结构阵列。(a) 为直接利用 MBE 方法在 Si(111) 衬底上蒸镀的原始的 Pb(111) 岛, 箭头所指的是选定的待处理的五个 Pb 岛; (b) 为利用 STM 操纵得到的字母“W”。扫描面积是 $5000\text{ nm} \times 5000\text{ nm}$ 。

利用 MBE 蒸镀得到的 Pb 楔形岛, 然后选择其中的“五个”特定岛进行操纵, 则原子从其它的岛向这些特定岛进行定向迁移。随着其它岛的不断衰减而最终被“擦除”, 选定的岛则被保留下来并不断生长。图 (b) 为最终得到的纳米图案

——字母“W”。通过比较，操纵前后的所有岛的总体积和质量近似守恒，再一次证明了大尺度的原子迁移。这种方法可以被用来有效的构造较大尺度的纳米结构。

5.5 总 结

利用 STM 的偏压脉冲来触发，可以使原来已经稳定的 Si(111) 衬底上的 Pb 岛发生再生长，同时伴随着大量的原子的定向迁移，迁移的长度可以达到几个微米以上。在量子效应的尺度内还表现出奇特的量子效应驱动的条纹状生长和双层生长，同时生长速度也在很大程度上受到量子阱态的调制。而在经典尺度内表现出台阶驱动的环状生长。

STM 操纵 Si(111) 衬底上 Pb 岛生长的过程从动力学角度主要可以分为三个部分：首先是 STM 脉冲诱导形核，然后是沿着岛边的快速生长（台阶与岛边的交叉处），当闭合的圆环在岛边形成之后就进入正常生长阶段，直到整个生长单层完成。

调节脉冲偏压的幅度和时间可以实现单层生长和多层生长，生长所需的原子主要是由周围邻近的岛衰减提供的。Pb 岛的受触发再生长属于自发的过程。

利用这种 STM 精确操纵 Pb 岛自发生长的方法，我们可以构造一些特定形状的 Pb 岛以及 Pb 岛阵列。

第六章 结 论

本论文工作利用 STM 系统的研究了 Pb/Si(111) 体系, 主要分为两部分:

- ① Si(111) 衬底上 Pb 纳米团簇的生长和结构性质
- ② Si(111) 衬底上 Pb 楔形岛的操纵和量子效应

在第一部分工作中, 我们通过调节 MBE 生长时的衬底温度, 合成出了 Si(111)-7×7 模板上的全同 Pb 纳米团簇阵列 ($120^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$)。全同纳米团簇具有三重对称性的 STM 像, 并且形貌随偏压明显变化。结合第一性原理总能量计算, 我们确定了具有六个 Pb 原子的“Pb6”混合结构模型。除了原子占位不同以外, Pb6 模型与 III 族金属纳米团簇具有类似的结构。团簇的形成过程中触发了 Pb 原子与三个顶角的 Si 吸附原子的替换。我们还研究了不同生长条件下 (主要时改变生长温度) 的 Pb 纳米团簇的稳定性。随着温度的降低, Pb6 团簇易于再吸附一个或两个额外的 Pb 原子而形成“Pb7”和“Pb8”模型; 随着温度的升高, Pb6 团簇会失去中间的一个 Pb 原子而形成“Pb5”结构。相应的对称性也有三重转变为两重。通过理论计算精确得出了“Pb5”, “Pb6”, “Pb7”和“Pb8”团簇系列的原子结构。

在第二部分工作中, 利用 STM 原子操纵技术精确的控制了大尺度纳米结构 (Pb 岛) 的生长和迁移等。通过外加合适的 STM 偏压脉冲, 可以触发 Pb 岛的任意层数的自发生长 (单层和多层)。伴随着大量的原子的定向迁移, 远在微米范围外的其它岛会发生衰减来提供所需的原子。在岛的厚度小于 24 单层时, 我们发现了量子效应驱动的动力学过程—选择性条纹状生长和双层生长。在整个过程中, 首先由量子效应驱动来降低系统的量子化电子能量, 然后由台阶作用驱动降低系统的经典能量。随着厚度的增加, 量子效应逐渐消失, 最终转变为经典的环状生长模式。在任何厚度下, 我们都能精确控制到单原子层生长。利用这种 STM 触发的晶体再生长技术, 我们可以在 Si(111) 衬底上任意搬动原子来构造特定的纳米结构和纳米结构阵列。我们还从理论角度分析了相应的生长与扩散机制, 与实验吻合的非常好。

参考文献

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. *Phys Rev Lett.* 1982, **49**:57-61
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel. 7×7 Reconstruction on Si(111) Resolved in Real Space. *Phys Rev Lett.* 1983, **50**:120-123
- [3] Gerd Binnig, Heinrich Rohrer. Scanning tunneling microscopy-from birth to adolescence. *Rev Mod Phys.* 1987, **59**:615-625
- [4] G. Binnig, H. Rohrer. In touch with atoms. *Rev Mod Phys.* 1999, **71**:S324-S330
- [5] C. J. Chen. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy. Oxford University Press, New York, 1993
- [6] 陈成均著, 华中一, 朱昂如, 金晓峰译. 扫描隧道显微学引论. 北京: 中国轻工业出版社, 1996
- [7] J. Bardeen. TUNNELING FROM A MANY-PARTICLE POINT OF VIEW. *Phys Rev Lett.* 1961, **6**:57-59
- [8] J. Tersoff, D. R. Hamann. Theory of the scanning tunneling microscope. *Phys Rev B.* 1985, **31**:805-813
- [9] [美]陈成钧著, 华中一朱昂如 金晓峰译. 扫描隧道显微学引论. 中国轻工业出版社, 1996
- [10] 白春礼. 扫描隧道显微术及其应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1993
- [11] G. Binnig, D. P. E. Smith. Single-tube three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy. *Rev Sci Instrum.* 1986, **57**:1688-1689
- [12] J. P. Ibe, P. P. Bey, S. L. Brandow, R. A. Brizzolara, N. A. Burnham, D. P. DiLella, K. P. Lee, C. R. K. Marrian, R. J. Colton. On the electrochemical

- etching of tips for scanning tunneling microscopy. *J Vac Sci Technol A*. 1990, **8**:3570-3575
- [13] J. K. Strosio, D. M. Eigler. Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope. *Science*. 1991, **254**:1319-1326
- [14] Ph. Avouris. Manipulation of matter at the atomic and molecular levels. *ACC Chem Res*. 1995, **28**:95-102
- [15] R. M. Nyffenegger, R. M. Penner. Nanometer-Scale Surface Modification Using the Scanning Probe Microscope: Progress since 1991. *Chem Rev*. 1997, **97**:1195-1230
- [16] Gerhard Meyer, Jascha Repp, Sven Zöhel, Kai-Felix Braun, Saw Wai Hla, Stefan Fösch, Ludwig Bartels, Francesca Moresco, Karl-Heinz Rieder. Controlled Manipulation of Atoms and Small Molecules with a Low Temperature Scanning Tunneling Microscope. *Single Mol*. 2000, **1**:79-86
- [17] G. Meyer, L. Bartels, S. Zöphel, K. H. Rieder. Lateral manipulation of adatoms and native substrate atoms with the low-temperature scanning tunneling microscope. *Appl Phys A*. 1999, **68**:125-129
- [18] Gerhard Meyer, Karl-Heinz Rieder. Controlled manipulation of single atoms and small molecules with the scanning tunneling microscope. *Surf Sci*. 1997, **377-379**:1087-1093
- [19] D. M. Eigler, E. K. Schweizer. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*. 1990, **344**:524-526
- [20] K. F. Kelly, D. Sarkar, G. D. Hale, S. J. Oldenburg, N. J. Halas. Threefold Electron Scattering on Graphite Observed with C₆₀-Adsorbed STM Tips. *Science*. 1996, **273**:1371-1373
- [21] L. Bartels, G. Meyer, K.-H. Rieder. Controlled vertical manipulation of single CO molecules with the STM: a route to chemical contrast. *Appl Phys Lett*. 1997, **71**:213-215

- [22] Stanislaus S. Wong, Ernesto Joselevich, Adam T. Woolley, Chin Li Cheung, Charles M. Lieber. Covalently functionalized nanotubes as nanometre-sized probes in chemistry and biology. *Nature*. 1998, **394**:52–55
- [23] G. Meyer, B. Neu, K.-H. Rieder. Controlled lateral manipulation of single molecules with the scanning tunneling microscope. *Appl Phys A*. 1995, **60**:343–345
- [24] Gerhard Meyer, Ludwig Bartels, Sven Zöphel, Erdmuth Henze, Karl-Heinz Rieder. Controlled Atom by Atom restructuring of a Metal Surface with the Scanning Tunneling Microscope. *Phys Rev Lett*. 1997, **78**:1512–1515
- [25] H. Tang, M. T. Cuberes, C. Joachim, J. K. Gimzewski. Fundamental considerations in the manipulation of a single C_{60} molecule on a surface with an STM. *Surf Sci*. 1997, **386**:115–123
- [26] D. H. Huang, M. Aono. Scanning tunneling microscopy fabrication of an Si atom chain. *Surf Sci*. 1997, **386**:166–168
- [27] M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler. Confinement of electrons to quantum corrals on a metal surface. *Science*. 1993, **262**:218–220
- [28] M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler. Quantum corrals. *Physica D*. 1995, **83**:98–108
- [29] H. C. Manoharan, C. P. Lutz, D. M. Eigler. Quantum mirage formed by coherent projection of electronic structure. *Nature*. 2000, **403**:512–515
- [30] Y. Hasegawa, Ph. Avouris. Direct Observation of Standing Wave Formation at Surface Steps Using Scanning Tunneling Spectroscopy. *Phys Rev Lett*. 1993, **71**:1071–1074
- [31] M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler. Imaging standing waves in a two-dimensional electron gas. *Nature*. 1993, **363**:524–527
- [32] A. J. Heinrich, C. P. Lutz, J. A. Gupta, D. M. Eigler. Molecule cascade. *Science*. 2002, **298**:1381–1387

- [33] N. Lorente, M. Persson, L. J. Lauhon, W. Ho. Symmetry Selection Rules for Vibrationally Inelastic Tunneling. *Phys Rev Lett.* 2001, **86**:2593–2596
- [34] B. C. Stipe, M. A. Rezaei, W. Ho. Single-Molecule Vibrational Spectroscopy and Microscopy. *Science.* June 1998, **280**(12):1732–1735
- [35] J. R. Hahn, W. Ho. Single Molecule Imaging and Vibrational Spectroscopy with a Chemically Modified Tip of a Scanning Tunneling Microscope. *Phys Rev Lett.* 2001, **87**:196102–1–196102–4
- [36] B. C. Stipe, M. A. Rezaei, W. Ho. Inducing and Viewing the Rotational Motion of a Single Molecule. *Science.* March 1998, **279**:1907–1909
- [37] H. J. Lee, W. Ho. Single-Bond Formation and Characterization with a Scanning Tunneling Microscope. *Science.* November 1999, **286**:1719–1722
- [38] J. R. Hahn, W. Ho. Oxidation of a Single Carbon Monoxide Molecule Manipulated and Induced with a Scanning Tunneling Microscope. *Phys Rev Lett.* 2001, **87**:166102–1–166102–4
- [39] B. C. Stipe, M. A. Rezaei, W. Ho. Single-Molecule Dissociation by Tunneling Electrons. *Phys Rev Lett.* 1997, **78**(23):4410–4413
- [40] F. Ullmann, G. M. Meyer, O. Loewenthal, O. Gilli. *Justus Liebig's Annalen der Chemie.* 1904, **331**:38
- [41] Saw-Wai Hla, Ludwig Bartels, Gerhard Mayer, Karl-Heinz Rieder. Inducing All Steps of a Chemical Reaction with the Scanning Tunnelling Microscope Tip: Towards Single Molecule Engineering. *Phys Rev Lett.* 2000, **85**:2777–2780
- [42] Francesca Moresco, Gerhard Mayer, Karl-Heinz Rieder. Conformational Changes of Single Molecule Induced By Scanning Tunneling Microscopy Manipulation: A Route to Molecular Switching. *Phys Rev Lett.* 2001, **86**:672–675

- [43] Francesca Moresco, Leo Gross, Micol Alemani, Karl-Heinz Rieder, Hao Tang, André Gourdon, Christian Joachim. Probing the Difference Stages in Contacting a Single Molecular Wire. *Phys Rev Lett*. 2003, **91**:036601-1-036601-4
- [44] R. Yamachika, M. Grobis, A. Wachowiak, M. F. Crommie. Controlled Atomic Doping of a Single C₆₀ Molecule. *Science*. April 2004, **304**:281-284
- [45] R. C. Jaklevic, L. Elie. Scanning-tunneling-microscope observation of surface diffusion on an atomic scale: Au on Au(111). *Phys Rev Lett*. 1988, **60**:120-123
- [46] L. J. Whitman, J. A. Stroscio, R. A. Dragoset, R. J. Celotta. Manipulation of adsorbed atoms and creation of new structures on room-temperature surfaces with a scanning tunneling microscope. *Science*. 1991, **251**:1206-1210
- [47] H. J. Mamin, P. H. Guethner, D. Rugar. Atomic Emission from a Gold Scanning-Tunneling-Microscope Tip. *Phys Rev Lett*. 1990, **65**:2418-2420
- [48] E. W. Müller. *Naturwissenschaften*. 1941, **29**:533
- [49] H. J. Mamin, S. Chiang, H. Brik, P. H. Cuethner, D. Rugar. Gold deposition from a scanning tunneling microscope tip. *J Vac Sci technol B*. 1991, **9**:1398-1402
- [50] D. M. Kolb, R. Ullmann, T. Will. Nanofabrication of Small Copper Clusters on Gold(111) Electrodes by a Scanning Tunneling Microscope. *Science*. 1997, **275**:1097-1099
- [51] Omicron NanoTechnology. VT Beam Deflection AFM User's Guide and Service Manual, September 2001
- [52] 白春礼, 田芳, 罗克. 扫描力显微术. 北京: 科学出版社, 1996
- [53] 吴自勤, 王兵著. 薄膜生长. 北京: 科学出版社, 2001
- [54] 张立德, 牟季美著. 纳米材料和纳米结构. 北京: 科学出版社, 2001

- [55] K. Wildberger, V.S. Stepanyuk, P. Lang, R. Zeller, P. H. Dederichs. Magnetic nanostructures: 4d clusters on Ag(001). *Phys Rev Lett.* 1995, **75**:509–512
- [56] M. Valden, X. Lai, D.W. Goodman. Onset of Catalytic Activity of Gold Clusters on Titania With the Appearance of Nonmetallic Properties. *Science.* 1998, **281**:1647–1650
- [57] M. Haruta. Size- and support-dependency in the catalysis of gold. *Catal Today.* 1997, **36**:153–166
- [58] Harald Brune, Marcella Ciovannini, Karsten Bromann, Klaus Kern. Self-organized growth of nanostructure arrays on strain-relief patterns. *Nature.* 1998, **394**:451–453
- [59] Ronald P. Anres, Thomas Bein, Matt Dorogi, Sue Feng, Jason I. Henderson, clifford P. Kubiak, William Mahoney, Richard G. Osifchin, R. Reifengerger. "Coulomb Staircase" at Room Temperature in a Self-Assembled Molecular Nanostructure. *Science.* 1996, **272**:1323–1325
- [60] A.O. Orlov, I. Amlani, G. H. Bernstein, and G. L. Snider C.S. Lent. Realization of a Functional Cell for Quantum-Dot Cellular Automata. *Science.* 1997, **277**:928–930
- [61] T.W. Kim, D.C. Choo, J.H. Shim, S.O. Kang. Single-electron transistors operating at room temperature, fabricated utilizing nanocrystals created by focused-ion beam. *Appl Phys Lett.* 2002, **80**:2168–2170
- [62] Karsten Bromann, Chrstian Félix, Harald Brune, Wolfgang harbich, René Monot, Jean Buttet, Klaus Kern. Controlled Deposition of Size-Selected Silver Nanoclusters. *Science.* 1996, **274**:956–958
- [63] L. Vitali, M. G. Ramsey, F. P. Netzer. Nanodot Formation on the Si(111)-(7×7) Surface by Adatom Trapping. *Phys Rev Lett.* 1999, **83**:316–319
- [64] Zheng Ouyang, Thomas A. Blake Zoltán Takáts, Bogdan Gologan, Andy J. Guymon, Justin M. Wiseman, Justin C. Oliver, V. Jo Davisson, R. Graham

- Cooks. Preparing Protein Microarrays by Soft-Landing of Mass-Selected Ions. *Science*. 2003, **301**:1351–1354
- [65] S. Facsko, T. Dekorsy, C. Koerdts, C. Trappe, H. Kurz, H.L. Hartnagel. Formation of Ordered Nanoscale Semiconductor Dots by Ion Sputtering. *Science*. 1999, **285**:1551–1553
- [66] C. T. Black, C.B. Murray, R.L. Sandstrom, Shouheng Sun. Spin-Dependent Tunneling in Self-Assembled Cobalt-Nanocrystal Superlattices. *Science*. 2000, **290**:1131–1134
- [67] Jian-Long Li, Jin-Feng Jia, Xue-Jin Liang, Xi Liu, Jun-Zhong Wang, Qi-Kun Xue, Zhi-Qiang Li, John S. Tse, Zhenyu Zhang, S. B. Zhang. Spontaneous Assembly of perfectly Ordered Identical-Size Nanocluster Arrays. *Phys Rev Lett*. 2002, **88**:066101–1–066101–4
- [68] Jin-Feng Jia, Xi Liu, Jun-Zhong Wang, Jian-Long Li, X. S. Wang, Qi-Kun Xue, Zhi-Qiang Li, Zhenyu Zhang, S. B. Zhang. Fabrication and structural analysis of Al, Ga, and In nanocluster crystals. *Phys Rev B*. 2002, **66**:165412–1–165412–10
- [69] Jin-Feng Jia, X. Liu, S. C. Li, J. Z. Wang, J. L. Li, H. Liu, M. H. Pan, R. F. Dou, Qi-Kun Xue. ARTIFICIAL METAL NANOCUSTER CRYSTALS. *Mod Phys Lett B*. 2002, **16**:889–894
- [70] M. Y. Lai, Y. L. Wang. Gallium-induced nanostructures on Si(111): From magic clusters to incommensurate structures. *Phys Rev B*. 1999, **60**:1764–1770
- [71] Zhenyu Zhang, Max G. Lagally. Atomic Processes in the Early Stages of Thin-Film Growth. *Science*. 1997, **276**:377–383
- [72] Jinfeng Jia, Jun-Zhong Wang, Xi Liu, Qi-Kun Xue, Zhi-Qiang Li, Y. Kawazoe, S. B. Zhang. Artificial nanocluster crystal: Lattice of identical Al clusters. *Appl Phys Lett*. 2002, **80**:3186–3188

- [73] Formation of the ordered array of Al magic clusters on Si(111) 7×7 . V. G. Kotlyar, and A. V. Zotov, and A. A. Saranin, T. V. Kasyanova, and M. A. Cherevik, and I. V. Pisarenko, and V. G. Lifshits. Phys Rev B. 2002, **66**:165401-1-065401-4
- [74] M. Y. Lai, Y. L. Wang. Self-organized two-dimensional lattice of magic clusters. Phys Rev B. 2001, **64**:241404(R)-1-241404(R)-4
- [75] H. H. Chang, M. Y. Lai, J. H. Wei, C. M. Wei, Y. L. Wang. Structure Determination of Surface Magic Clusters. Phys Rev Lett. 2004, **92**:066103-1-066104-4
- [76] Kehui Wu, Y. Fujikawa, T. Nagao, Y. Hasegawa, K. S. Nakayama, Q. K. Xue, E. G. Wang, T. Briere, V. Kumar, Y. Kawazoe, S. B. Zhang, T. Sakurai. Na Adsorption on the Si(111)- 7×7 Surface: From Two-Dimensional Gas to Nanocluster Array. Phys Rev Lett. 2003, **91**:126101-1-126101-4
- [77] K. A. 杰克逊主编, 屠海令, 万群等译校. 半导体工艺 (材料科学与技术丛书). 北京: 科学出版社, 1999
- [78] P. Estrup, J. Mjorrison. Surf Sci. 1964, **2**:465
- [79] M. Saitoh, F. Shoji K. Oura, K. Asano, T. Hanawa. Surf Sci. 1985, **154**:394
- [80] G. Le Lay, J. Peretti, M. Hanbucken. Surf Sci. 1988, **204**:57
- [81] F. Grey, R. Feidenhans'l, M. Nielsen, R.L. Johnson. Colloq Phys C. 1989, **7**:181
- [82] Eric Ganz, Fulin Xiong, Ing-Shouh Hwang, Jene Golovchenko. Submonolayer phases of Pb on Si(111). Phys Rev B. 1991, **43**:7316-7318
- [83] Ing-Shouh Hwang, Jene A. Golovchenko. Tunneling Microscope Observation of a Structural Surface Phase Transition: Structure, Fluctuation, and Local Effects. Phys Rev Lett. 1993, **71**:255-258

- [84] D. Tang, H. E. Elsayed-Ali, J. Wendelken, J. Xu. Scanning-tunneling-microscopy study of Pb on Si(111). *Phys Rev B*. 1995, **52**:1481–1484
- [85] Roland R. Stumpf, Joseph M. Carpinelli, Hanno H. Weitering. Apparent charge transfer at the $\text{Ge}_x\text{Pb}_{1-x}/\text{Ge}(111)$ interface. *Phys Rev B*. 1999, **59**:15779–15783
- [86] B. Ressel, J. Slezák, K. C. Prince, V. Cháb. Quantized valence states of the Pb/Si(111) mosaic phase. *Phys Rev B*. 2002, **66**:035325–1–035325–5
- [87] J. Slezák, P. Mutombo, V. Cháb. STM study of a Pb/Si(111) interface at room and low temperatures. *Phys Rev B*. 1999, **60**:13328–13330
- [88] J. M. Gómez-Rodríguez, J.-Y. Veullen, R. C. Cinti. Scanning tunneling microscopy study of the Si(111)-($\sqrt{3} \times \sqrt{3}$)-Pb mosaic phase. *Surf Sci*. 1997, **377-379**:45–49
- [89] O. Custance, I. Brihuega, J.-Y. Veullen, J. M. Gómez-Rodríguez, A. M. Baró. STM study of dynamical effects on submonolayer phases of Pb/Si(111). *Surf Sci*. 2001, **482-485**:878–885
- [90] Xiao Tong, Kotaro Horikoshi, Shuji Hasegawa. Structure and electrical conductance of Pb-covered Si(111) surfaces. *Phys Rev B*. 1999, **60**:5653–5657
- [91] J. Slezák, P. Mutombo, V. Cháb. Temperature study of phase coexistence in the system Pb on an Si(111) surface. *Surf Sci*. 2000, **454-456**:584–590
- [92] M. Hupalo, J. Schmalian, M. C. Tringides. "Devil's Staircase" in Pb/Si(111) Ordered Phases. *Phys Rev Lett*. 2003, **90**:216106–1–216106–4
- [93] O. Custance, J. M. Gómez-Rodríguez, A. M. Baró, L. Juré, P. Mallet, J.-Y. Veullen. Low temperature phases of Pb/Si(111). *Surf Sci*. 2001, **482-485**:1399–1405
- [94] S. Brochard, Emilio Artacho, O. Custance, I. Brihuega, A. M. Baró, J. M. Soler, J. M. Gómez-Rodríguez. *Ab initio* calculations and scanning tunneling

- microscopy experiments of the Si(111)-($\sqrt{7} \times \sqrt{3}$)-Pb surface. *Phys Rev B*. 2002, **66**:205403-1-205403-9
- [95] O. Custance, S. Brochard, I. Brihuega, Emilio Artacho, J. M. Soler, A. M. Baró, J. M. Gómez-Rodríguez. Single adatom adsorption and diffusion on Si(111)-(7×7) surfaces: Scanning tunneling microscopy and first-principles calculations. *Phys Rev B*. 2003, **67**:235410-1-235410-4
- [96] J. M Gómez-Rodríguez, J. J. Sáenz, A. M. Baró, J.-Y. Veuillen, R. C. Cinti. Real-Time Observation of the Dynamics of single Pb Atoms on Si(111)-7×7 by Scanning Tunneling Microscopy. *Phy Rev Lett*. 1996, **76**:799-802
- [97] J. M. Gómez-Rodríguez, J. Y. Veuillen, R. C. Cinti. Pb/Si(111) investigation at the ultralow-coverage range. *J Vac Sci Technol B*. 1996, **14**:1005-1009
- [98] J.-Y. Veuillen, J. M. Gómez-Rodríguez, A. M. Baró, R. C. Cinti. Adsorption and diffusion of single Pb atoms on Si(111) 7×7 and Si(111) 5×5 surfaces studied by scanning tunneling microscopy. *Surf Sci*. 1997, **377-379**:847-850
- [99] St. Tosch, H. Neddermeyer. Initial Stage of Ag Condensation on Si(111) 7×7. *Phys Rev Lett*. 1988, **61**:349-352
- [100] H. F. Hsu, L. J. Chen, H. L. Hsiao, T. W. Pi. Adsorption and switching behavior of individual Ti atoms on the Si(111)-7×7 surface. *Phys Rev B*. 2003, **68**:165403-1-135403-9
- [101] Ilya Chizhov, Geunseop Lee, Roy F. Willis. Initial stages of Au adsorption on the Si(111)-(7×7) surface studied by scanning tunneling microscopy. *Phys Rev B*. 1997, **56**:12316-12320
- [102] O. Custance, I. Brihuega, J. M. Gómez-Rodríguez, A. M. Baró. Initial stage of Sn adsorption on Si(111)-(7×7). *Surf Sci*. 2001, **482-485**:1406-1412
- [103] Karl D. Brommer, M. Galván, Jr. A. Dal Pino, J. D. Joannopoulos. Theory of adsorption of atoms and molecules on Si(111)-(7×7). *Surf Sci*. 1994, **314**:57-70

- [104] K. Cho, E. Kaxiras. Intermittent diffusion on the reconstructed Si(111) surface. *Europhys Lett.* 1997, **39**:287–292
- [105] Kyeogjae Cho, Efthimios Kaxiras. Diffusion of adsorbate atoms on the reconstructed Si(111) surface. *Surf Sci.* 1998, **396**:L261–L266
- [106] Ph. Sonnet, L. Stauffer, C. Minot. Adsorption and diffusion mechanisms of Pb on Si(111)-(7×) in the initial stages of Pb chemisorption. *Surf Sci.* 1998, **407**:121–132
- [107] Ph. Sonnet, L. Stauffer, H. Ezzehar, C. Minot. Interpretation of the photoemission spectra of Pb/Si(111)-(7×7) in the initial stages of the Pb chemisorption: a theoretical study. *Surf Sci.* 1998, **416**:274–287
- [108] P. Sonnet, L. Stauffer, C. Minot. Comparison of the first stages of the adsorption of Pb and Ge on the Si(111)-7×7 surface. *Surf Sci.* 1998, **402-404**:751–756
- [109] M. Yoon, X. F. Lin, H. Mai, R. F. Willis. Self-assembled nanodot arrays on Si(111)-(7×7) surfaces. *Phys Rev B.* 2001, **64**:085321–1–085321–5
- [110] Y. P. Zhang, L. Yan, S. S. Xie, S. J. Pang, H.-J. Gao. Formation of ordered Ge quantum dots on the Si(111)-(7×7) surface. *Appl Phys Lett.* 2001, **79**:3317–3319
- [111] Arthur R. Smith, Kuo-Jen Chao, Qian Niu, Chih-Kang Shih. Formation of Atomically Flat Silver Films on GaAs with a "Silver Mean" Quasi Periodicity. *Science.* 1996, **273**:226–228
- [112] I.B. Altfeder, D. M. Chen, K. A. Matveev. Imaging Buried Interfacial Lattices with Quantized Electrons. *Phys Rev Lett.* 1998, **80**:4895–4898
- [113] W. B. Jian, W. B. Su, C. S. Chang, T. T. Tsong. Vertical Friedel Oscillations in Interface-Induced Surface Charge Modulations of Ultrathin Quantum Islands. *Phys Rev Lett.* 2003, **90**:196603–1–196603–4

- [114] Hawoong Hong, C.-M. Wei, M. Y. Chou, Z. Wu, L. Basile, H. Chen, M. Holt, T.-C. Chiang. Alternating Layer and Island Growth of Pb on Si by Spontaneous Quantum Phase Separation. *Phys Rev Lett.* 2003, **90**:076104-1-076104-4
- [115] A. Crottini, D. Cvetko, L. Floreano, R. Gotter, A. Morgante, F. Tommasini. Step Height Oscillation during Layer-by-Layer Growth of Pb on Ge(001). *Phys Rev Lett.* 1997, **79**:1527-1530
- [116] Giuliana Materzanini, Peter Saalfrank, Philip J. D. Lindan. Quantum size effects in metal films: Energies and charge densities of Pb(111) grown on Cu(111). *Phys Rev B.* 2001, **63**:235405-1-235405-9
- [117] Roberto Otero, Amadeo L. Vázquez de parga, Rodolfo Miranda. Observation of preferred heights in Pb nanoislands: A quantum size effect. *Phys Rev B.* 2002, **66**:115401-1-115401-6
- [118] P. Czoschke, Hawoong Hong, L. Basile, T.-C. Chiang. Quantum Oscillation in the Layer Structure of Thin Metal Films. *Phys Rev Lett.* 2003, **91**:226801-1-226801-4
- [119] T.-C. Chiang. Photoemission studies of quantum well states in thin films. *Surf Sci Rep.* 2000, **39**:181-235
- [120] R.K. Kawakami, E. Rotenberg, Hyuk J. Choi, Ernesto J. Escorcia-Aparicio, M. O. Bowen, J. H. Wolfe, E. Arenholz, Z.D. Zhang, N.V. Smith, Z.Q. Qiu. Quantum-well states in copper thin films. *Nature.* 1999, **398**:132-134
- [121] C. Rogero L. Aballe, P. Kratzer, S. Gokhale, K. Horn. Probing Interface Electronic Structure with Overlayer Quantum-Well Resonances: Al/Si(111). *Phys Rev Lett.* 2001, **87**:156801-1-156801-4
- [122] J. J. Paggel, T. Miller, T.-C. Chiang. Quantum-Well States as Fabry-Pérot Modes in a Thin-Film Electron Interferometer. *Science.* 1999, **283**:1709-1711

- [123] A. Mans, J. H. Dil, A. R. F. Ettema, H. H. Weitering. Quantum electronic stability and spectroscopy of ultrathin Pb films on Si(111) 7×7 . Phys Rev B. 2002, **66**:195410-1-195410-7
- [124] D.-A. Luh, T. Miller, J.J. Paggel, M. Y. Chou, T.-C. Chiang. Quantum Electronic Stability of Atomically Uniform Films. Science. 2001, **292**:1131-1133
- [125] Zhenyu Zhang, Qian Niu, Chih-Kang Shih. "Electronic Growth" of Metallic Overlayers on Semiconductor Substrates. Phys Rev Lett. 1998, **80**:5381-5384
- [126] Zhigang Suo, Zhenyu Zhang. Epitaxial films stabilized by long-range forces. Phys Rev B. 1998, **58**:5116-5120
- [127] Jun-Hyung Cho, Qian Niu, Zhenyu Zhang. Oscillatory Nonmetal-Metal Transition of Ultrathin Sb Overlayers on a GaAs(110) Substrate. Phys Rev Lett. 1998, **80**:3582-3585
- [128] Luca Gavioli, Kevin R. Kimberlin, Michael C. Tringides, John F. Wendelken, Zhenyu Zhang. Novel Growth of Ag Islands on Si(111): Plateaus with a Singular Height. Phys Rev Lett. 1999, **82**:129-132
- [129] Jun-Hyung Cho, Ismail, Zhenyu Zhang, E. W. Plummer. Oscillatory lattice relaxation at metal surfaces. Phys Rev B. 1999, **59**:1677-1680
- [130] C.-S. Jiang, Hongbin Yu, C.-K. Shih, Ph. Ebert. Effect of the Si substrate structure on the growth of two-dimensional thin Ag films. Surf Sci. 2002, **518**:63-71
- [131] W.B. Su, S. H. Chang, W. B. Jian, C. S. Chang, L. J. Chen, Tien T. Tsong. Correlation between Quantized Electronic States and Oscillatory Thickness Relaxations of 2D Pb Islands on Si(111)-(7×7) Surfaces. Phys Rev Lett. 2001, **86**:5116-5119

- [132] S. H. Chang, W. B. Su, W. B. Jian, C. S. Chang, L. J. Chen, Tien T. Tsong. Electronic growth of Pb islands on Si(111) at low temperature. *Phys Rev B*. 2002, **65**:245401-1-245401-6
- [133] W. B. Su, S. H. Chang, H.Y. Lin, Y.P. Chiu, T. Y. Fu, C. S. Chang, Tien T. Tsong. Formation of multilayer two-dimensional Pb islands on Si(111) 7×7 at low temperature: From nucleation to growth. *Phys Rev B*. 2003, **68**:033405-1-033405-4
- [134] V. Yeh, Berbil-Bautista, C. Z. Wang, K. M. Ho, M. C. Tringides. Role of the Metal/Semiconductor Interface in Quantum Size Effects: Pb/Si(111). *Phys Rev Lett*. 2000, **85**:5158-5161
- [135] K. Budde, E. Abram, V. Yeh, M. C. Tringides. Uniform, self-organized, seven-step height Pb/Si(111)-(7×7) islands at low temperatures. *Phys Rev B*. 2000, **61**:R10602-R10605
- [136] M. Hupalo, S. Kremmer, V. Yeh, L. Berbil-Bautista, E. Abram, M. C. Tringides. Uniform island height selection in the low temperature growth of Pb/Si(111)-(7×7). *Surf Sci*. 2001, **493**:526-538
- [137] I.B. Altfeder, K. A. Matveev, D. M. Chen. Electron Fringes on a Quantum Wedge. *Phys Rev Lett*. 1997, **78**:2815-2818
- [138] Hiroshi Okamoto, Dongmin Chen, Toshishige Yamada. Competing Classical and Quantum Effects in Shape Relaxation of a Metallic Island. *Phys Rev Lett*. 2002, **89**:256101-1-256101-4
- [139] Holger Röder, Elmar Hahn, Harald Brune, Jean-Pierre Bucher, Klaus Kern. Building one- and two-dimensional nanostructures by diffusion-controlled aggregation at surfaces. *Nature*. 1993, **366**:141-143
- [140] Th. Schmidt, E. Bauer. Interfactant-mediated quasi-Frank-van der Merwe growth of Pb on Si(111). *Phys Rev B*. 2000, **62**:15815-15825

- [141] Th. Schmidt, E. Bauer. Influence of interfactants on thin metal film growth. Surf Sci. 2001, **480**:137–144
- [142] A. Menzel, M. Kammler, E. H. Conrad, V. Yeh, M. Hupalo, M. C. Tringides. Kinetic measurements of Pb island growth on Si(111). Phys Rev B. 2003, **67**:165314–1–135314–7
- [143] Peter J. Feibelman. *Ab initio* step and kink formation energies on Pb(111). Phys Rev B. 2000, **62**:17020–17025
- [144] H. P. Bonzel, A. Emundts. Absolute Values of Surface and Step Free Energies from Equilibrium Crystal Shapse. Phys Rev Lett. 2000, **84**:5804–5807
- [145] M. Nowicki, C. Bombis, A. Emundts, H. P. Bonzel. Absolute step and kink formation energies of Pb derived from step roughening of two-dimensional islands and facets. Phys Rev B. 2003, **67**:075405–1–075405–7
- [146] C.M. Wei, M.Y. Chou. Theory of quantum size effects in thin Pb(111) films. Phys Rev B. 2002, **66**:233408–1–233408–4
- [147] Karina Morgenstern, Georg Rosenfeld, George Comsa. Decay of Two-Dimensional Ag Islands on Ag(111). Phys Rev Lett. 1996, **76**:2113–2116
- [148] M. Giesen, adn H. Ibach G. Schulze Icking-Konert. Fast Decay of Adatom Islands and Mounds on Cu(111): A New Effective Channel for Interlayer Mass Transport. Phys Rev Lett. 1998, **80**:552–555
- [149] Margret Giesen. Coalescence induced rapid decay of adatom and vacancy island on Cu(111). Surf Sci. 1999, **441**:391–398
- [150] M. Giesen, H. Ibach. Step edge barrier controlled decay of multilayer islands on Cu(111). Surf Sci. 1999, **431**:109–115
- [151] Karina Morgenstern, Georg Rosenfeld, George Comsa, Mads R. Sørensen, Erik Lægsgaard Bjørk Hammer, Flemming Besenbacher. Kinetics of fast island decay on Ag(111). Phys Rev B. 2001, **63**:045412–1–045412–5

- [152] Hyeong-Chai Jeong, Ellen D. Williams. Steps on surfaces: experiment and theory. *Surf Sci Rep.* 1999, **34**:171–294
- [153] W. W. Mullins, G. S. Rohrer. Nucleation Barriers for Volume Conserving Shape Changes of Faceted Crystals. *J Am Ceram Soc.* 2000, **83**:214–16
- [154] Gregory S. Rohrer, C. Lane Rohrer, William W. Mullins. Nucleation Energy Barriers for Volume-Conserving Shape Changes of Crystals with Nonequilibrium Morphologies. *J Am Ceram Soc.* 2001, **84**:2099–104
- [155] Wenguang Zhu Francesco Buatier de Mongeot, A. Molle, R. Buzio, C. Boragno, U. Valbusa, E. G. Wang, Zhenyu Zhang. Nanocrystal Formation and Faceting Instability in Al(110) Homeepitaxy: *True* Upward Adatom Diffusion at Step Edges and Island Corners. *Phys Rev Lett.* 2003, **91**:016102–1–016102–4
- [156] Francesco Buatier de Mongeot Wenguang Zhu, U. Valbusa, E. G. Wang, Zhenyu Zhang. Adatom Ascending at Step Edges and Faceting on fcc Metal (110) Surfaces. *Phys Rev Lett.* 2004, **92**:106102–1–106102–4
- [157] Martin Zinke-Allmang, Leonard C. Feldman, Marcia H. Grabow. Clustering on surfaces. *Surf Sci Rep.* 1992, **16**:377–463

攻读博士学位期间的发表论文情况

2001 年 10 月——2004 年 5 月 (SF04 组) :

- ① Shao-Chun Li, Jin-Feng Jia, Rui-Fen Dou, Qi-Kun Xue, Iskander G. Batyrev and S.B. Zhang, "Borderline magic clustering: The fabrication of tetravalent Pb cluster arrays on Si(111)-7×7 surfaces" , *Submitted*.
- ② Shao-Chun Li, Jin-Feng Jia, Yan-Feng Zhang, Qi-Kun Xue, Qian Niu, Feng Liu, and Dongmin Chen, "Manipulation of Large-Scale Mass Transport" , *Submitted*.
- ③ Y. Han, J. Y. Zhu, Feng Liu, Shao-Chun Li, Jin-Feng Jia, and Qi-Kun Xue, "Coulomb Sink: a novel Coulomb effect on coarsening of metal nanoclusters on semiconductor surface" , *Phys. Rev. Lett. (in Press)*
- ④ C.-S. Jiang, S.-C. Li, H.-B. Yu, D. Eom, X.-D. Wang, Ph. Ebert, J.-F. Jia, Q.-K. Xue, and C.-K. Shih, "Building Pb Nanomesas with Atomic-Layer Precision" , *Phys. Rev. Lett.* **92** (10): Art. No. 106104 MAR 12 2004
- ⑤ J.-F. Jia, X. Liu, S.-C. Li, J.-Z. Wang, J.-L. Li, H. Liu, M.-H. Pan, R.-F. Dou and Q.-K. Xue, "Artificial metal nanocluster crystals" , *Mod. Phys. Lett. B* **16** (23-24): 889-894 OCT 20 2002
- ⑥ J.-F. Jia, J.-L. Li, X.-J. Liang, X. Liu, J.-Z. Wang, H. Liu, R.-F. Dou, M.-J. Xu, M.-H. Pan, S.-C. Li, and Q.-K. Xue, "Spontaneous fabrication of periodic identical nanocluster arrays by magic clustering process on nonaostructured template" , *J. Chin. Electron Microscopy Soc.* **21** (3): 270-278 JUN 2002

2000 年 7 月——2001 年 10 月 (C512 组) :

- ① C.-Q. Jin, S.-C. Li, R.-C. Yu, F.-Y. Li, R.-J. Wang, J.-L. Zhu, Z.-X. Liu and L.-C. Chen, "Property studies of MgB₂ superconductor directly synthesized using high pressure" , J. Phys.: Condens. Matter. **14** (44): 10771-10778 NOV 11 2002
- ② Z-X Liu, C-Q Jin, J-Y You, S.-C. Li, J-L Zhu, R-C Yu, F-Y Li and S-K Su, "The increase in T_c for MgB₂ superconductor under high pressure" , J. Phys.: Condens. Matter. **14** (44): 11301-11304 NOV 11 2002
- ③ N. Jiang, B. Jiang, JCH Spence, R.-C. Yu, S.-C. Li, C.-Q. Jin, "Anisotropic excitons in MgB₂ from orientation-dependent electron-energy-loss spectroscopy" , Phys. Rev. B **66** (17): Art. No. 172502 NOV 1 2002
- ④ F.-Y. Li, R.-J. Wang, S.-C. Li, L.-C. Chen, J.-L. Zhu, Z.-X. Liu, R.-C. Yu, and C.-Q. Jin, "Ultrasound studies of MgB₂ superconductor under hydrostatic pressure" , Phys. Rev. B **65** (13): Art. No. 132517 APR 1 2002
- ⑤ C.-Q. Jin, S.-C. Li, J.-L. Zhu, F.-Y. Li, Z.-X. Liu, and R.-C. Yu, "High critical current density of a MgB₂ bulk superconductor high-pressure synthesized directly from the elements" , J. Mater. Res. **17** (3): 525-527 MAR 2002
- ⑥ X. Kong, Y.-Q. Wang, H. Li, X.-F. Duan, R.-C. Yu, S.-C. Li, F.-Y. Li, C.-Q. Jin, "Electron energy-loss spectroscopy characterization of the boron p-like density of states in MgB₂" Appl. Phys. Lett. **80** (5): 778-780 FEB 4 2002
- ⑦ Z.-X. Liu, C.-Q. Jin, J.-Y. You, S.-C. Li, J.-L. Zhu, R.-C. Yu, F.-Y. Li, S.-K. Su, "Enhanced MgB₂ superconductivity under high pressure" , Chin. Phys. Lett. **19** (1): 120-121 JAN 2002

- ⑧ R.-C. Yu, S.-C. Li, Y.-Q. Wang, X. Kong, J.-L. Zhu, F.-Y. Li, Z.-X. Liu, X.-F. Duan, Z. Zhang, C.-Q. Jin, “EELS studies of MgB₂ superconductor obtained under high pressure” , Physica C **363** (3): 184-188 NOV 15 2001

- ⑨ H. D. Yang, J.-Y. Lin, H. H. Li, F. H. Hsu, C. J. Liu, S.-C. Li, R.-C. Yu, and C.-Q. Jin, “Order parameter of MgB₂: A fully gapped superconductor” , Phys. Rev. Lett. **87** (16): Art. No. 167003 OCT 15 2001

- ⑩ S.-C. Li, R.-J. Wang, F.-Y. Li, Z.-X. Liu, J.-L. Zhu, R.-C. Yu, C.-Q. Jin, “Ultrasonic Properties of the MgB₂ Superconductor” , Chin. Phys. Lett. **18** (10): 1369-1370 OCT 2001

- ⑪ S.-C. Li, J.-L. Zhu, R.-C. Yu, F.-Y. Li, Z.-X. Liu, C.-Q. Jin, “High-pressure Synthesis of MgB₂ Superconductor with T_c Above 39K” , Chin. Phys. **10** (4): 338-339 APR 2001

致 谢

衷心感谢我的导师薛其坤研究员和贾金锋研究员。在他们的关心和指导下, 本论文才得以完成。从两位导师身上, 不仅学到了科学知识, 还学会了如何做科研工作, 这些都会使我受益终身。

衷心感谢物理所的靳常青研究员以及极端条件实验室 C512 组的全体老师, 我在进入物理所的第一年时间的学习就是在靳常青研究员的指导下完成的。

衷心感谢美国再生能源实验室的张绳百教授, 本论文中的量子点部分的第一性原理计算由张绳百教授完成。衷心感谢哈佛大学罗兰研究所的陈东敏教授, 犹他大学的刘峰教授, 德克萨斯大学奥斯汀分校的施至刚教授和牛谦教授, 他们在本论文的第二部分工作中给予了大力的帮助。

衷心感谢我们组的张青哲老师, 马旭村老师, 孟庆波老师, 梁学锦老师和杜小龙老师在生活和工作中的鼓励和支持, 使我能够克服很多困难。

衷心感谢曾经在我们组工作过的王俊忠博士后, 潘明虎博士后, 刘熙博士, 孙海林博士, 赵立强博士在仪器操作上的指导。

衷心感谢我们组的刘洪, 徐茂杰, 沈全通和窦瑞芬同学的互相关心和帮助。

衷心感谢张艳锋同学和王得勇同学在实验上的大力帮助, 她们协助我完成了很多复杂的实验。

衷心感谢任安德同学在英文写作方面的指导帮助。

衷心感谢我们组的其他同学, 何珂同学, 王健同学, 王立莉同学, 张丽娟同学, 王治涛同学, 梅增霞同学, 薛勃飞同学, 曾兆权同学, 郑浩同学, 刘慧同学, 姜鹏同学, 蔡伟伟同学, 唐喆同学, 韩铁柱同学, 齐云同学, 马丽颖同学, 吴蕊同学, 郭阳博士后, 英敏菊博士后, 刘宝利博士后等人的和睦相处。