

用电流扫描法在 Si(111)-7×7 表面上实现单原子操纵

杨海强^{1,2} 高聚宁¹ 薛增泉² 庞世瑾¹

(1 中国科学院凝聚态物理中心北京真空物理实验室 北京 100080)

(2 北京大学无线电电子学系 北京 100871)

摘要 本文提出用电流脉冲法在 Si(111)-7×7 表面进行单原子操纵,用恒电流扫描的方法在 Si(111)-7×7 表面形成纳米级沟槽结构。通过分析 Si(111)-7×7 表面的原子结构模型指出,当线扫描的方向平行于 Si(111)-7×7 表面的基矢方向,并且原子操纵后形成的沟槽的边界处于基矢方向上原子空位的连线时,所得到的沟槽才具有原子级平直的边界。这是在 Si(111)-7×7 表面可能得到的最稳定的人造原子级结构,并在实验中实现了这种结构。本文对原子操纵的机理也进行了分析。

PACC: 6116P, 6820, 8160C

随着微电子工业的不断发展,集成器件的线宽在不断地降低,从亚微米技术向纳米(0.1~100nm)免地会遇到许多新的问题,如:怎样形成纳米级结构,如何测量这些结构的性质等等。扫描隧道显微镜(STM)的发明^[1]为这一研究领域的发展提供了有力的工具。由于扫描隧道显微镜具有原子级分辨率,可以用它在实空间直接观察到表面的原子排列。通过调节针尖和样品表面原子之间作用力的大小,在适当的条件下,能够移动吸附在样品表面上的单个原子形成一定的图形^[2]。通过将针尖逼近样品表面,并在针尖和样品之间加电压脉冲可对样品表面或针尖上的单个原子进行操纵,即将样品表面的原子提出或将针尖上的原子沉积到样品表面形成图形^[3,4]。通过连续的单原子或原子团的操纵,可以在样品表面加工形成线宽只有几个纳米的任意形状的结构^[5~10]。因此 STM 可以用作“光刻”的工具,形成我们所需要的纳米级或原子级结构。在前面的研究工作中,他们所用的方法主要是电压脉冲法或靠针尖和样品之间的接触来对样品进行加工。本文我们提出一种新的加工法——电流扫描法,即通过控制隧道电流的大小,用线扫描来实现原子操纵的方法。它不仅可以用来进行单原子操纵,也可以快速有效地形成纳米级结构。同时我们还提出了在 Si(111)-7×7 表面得到具有原子级平直边界的稳定的人造纳米级结构所必须的条件,并在实验中得到了这种结构。本文对原子操纵的机理也进行了分析。

实验使用德国 Omicron 公司生产的 STM 1 型超高真空扫描隧道显微镜。样品是 p 型硅。

(111) 抛光片, 电阻率为 $0.1 \sim 1 \Omega \cdot \text{cm}$. 首先将样品在 600 加热去气, 然后将样品迅速升温到 1200, 随后将样品缓缓降温到室温, 降温速率小于 $1 / \text{s}$. 经过几次升温、降温处理后可以得到大面积的 Si(111)-7×7 重构表面. 处理样品的过程中, 真空室的真空度好于 $1.33 \times 10^{-8} \text{Pa}$. 观察表面时所用的偏压为 2.0V, 样品为正, 隧道电流为 1.0nA, 扫描模式为恒电流扫描模式.

图 1(a) (见图版 D) 为处理后得到的大面积 Si(111)-7×7 重构结构的一部分. 图中的菱形内为一个 Si(111)-7×7 重构单元. 图 1(b) (见图版 D) 为 Si(111)-7×7 重构单元的原子结构模型^[11]. 它的表面由 12 个顶戴原子和一个空位组成, 在 STM 图象中显示为 12 个亮点和一个黑洞, 这 12 个亮点是由 12 个顶戴原子的悬挂键造成的.

图 2(见图版 D) 给出在 Si(111)-7×7 表面进行单原子操纵的过程. (a) 为原子操纵前直接观察样品表面得到的 Si(111)-7×7 的原子结构图象. 图象的右下角 A 处为一原子空位, 它是由于样品表面在形成 Si(111)-7×7 重构结构时丢失一个顶戴原子所造成的. 它在我们原子操纵过程中作为标记. 在进行单原子操纵时, 首先将针尖移动到所要提出原子的上方, 图 2(a) 左上方箭头所示, 然后加电流脉冲, 所用的隧道电流为 40nA, 作用时间为 10ms. 随后观察原子操纵后的同一区域, 得到图 2(b) 的结果. 我们发现箭头所指的原子被提出, 见图 2(b) 的 B 处. 然后我们将针尖移动到左下方箭头所指的原子, 用同样的方法操纵后对同一区域进行观察, 发现箭头所指的原子被提出, 见图 2(c) 的 C 处. 提出的硅原子一部分吸附在针尖上, 另一部分重新沉积到样品表面并扩散到其它区域^[12]. 这说明用我们提出的电流脉冲法是可以进行单原子操纵的.

图 3(见图版 D) 中的 A、B 两条沟槽是用恒电流扫描得到的, 它们是经过两次线扫描得到的. 扫描时所用的隧道电流 $I = 40\text{nA}$, 偏压 $V = 2.0\text{V}$, 扫描模式为恒电流扫描模式. 线扫描方向沿 Si(111)-7×7 表面的一个基矢方向. 提出原子后得到的沟槽的宽度为一个单胞的宽度. 两沟槽之间的间隔也是一个单胞的宽度. 从操纵后沟槽的边界可以看到, 沟槽具有原子级平直的边界. 通过对 Si(111)-7×7 的原子结构模型(图 1(b)) 的分析我们可以看到, 当原子操纵方向平行于 Si(111)-7×7 表面的基矢方向, 并且操纵后沟槽的边界处于空位的连线方向时, 所得到的结构才能具有原子级平直的边界. 这种结构所产生的悬挂键最少, 并且它尽量保持了残余 Si(111)-7×7 结构的完整性. 因此它是一种稳定的结构. 这是到目前为止我们在 Si(111)-7×7 表面所观察到的最稳定的人造纳米级结构.

为了对原子操纵的机理进行分析, 我们测量了原子操纵时隧道电阻阈值随偏压的关系曲线, 如图 4 所示(见图版 D). 隧道电阻是指加在针尖和样品之间的偏压与所产生的隧道电流的比值, 它的大小反映了针尖和样品之间作用力的大小^[13~15]. 隧道电阻越大则作用力越小, 反之, 则越大. 隧道电阻阈值是指当隧道电阻的值大于该值时, 即针尖和样品的作用力小于某值时, 在指定的偏压下就不可能将 Si(111)-7×7 表面的原子提出, 只有当隧道电阻值小于该值时, 在指定的偏压下才能将 Si(111)-7×7 表面的原子提出. 从图中可以看到, 当偏压很小(小于 0.8V) 时, 隧道电阻阈值基本为一常数, 它的值为 $15\text{M}\Omega$. 这说明在这种情况下, 要想从样品表面提出原子, 就必须在针尖和样品之间形成很强的相互作用力, 而且所需的最小作用力基本不随隧道偏压的变化而变化. 这就是说, 在隧道偏压很小时, 针尖和样品之间的作用力是原子操纵的主要作用力, 针尖和样品之间的电场作用是次要的. 当隧道偏压较大(大于 0.8V) 时, 隧道电阻阈值随偏压的增加而迅速增大, 即针尖和样品之间的作用力

迅速减小, 而此时的电场强度却在不断增加. 这说明, 在偏压较大时, 针尖和样品之间的电场为原子操纵的主要作用力.

我们提出了一种原子操纵的新方法, 用电流脉冲法在 Si(111)- 7×7 表面实现了单原子操纵, 并用恒电流扫描的方法在 Si(111)- 7×7 表面形成纳米级的沟槽. 分析指出, 当线扫描的方向平行于 Si(111)- 7×7 表面的基矢方向, 且原子操纵后形成的沟槽的边界处于基矢方向的空位连线时, 所得到的沟槽具有原子级平直的边界. 并且是一种稳定的结构. 对原子操纵的机理进行了分析, 发现当隧道偏压较小(小于 0.8V)时, 针尖和样品表面原子之间的作用力是原子操纵的主要作用力; 而当偏压较大时, 针尖和样品之间的电场为原子操纵的主要作用力.

参 考 文 献

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber *et al*, Phys Rev. Lett, 1982, **49**: 57~ 60.
- [2] D. M. Eigler, E. K. Schweizer, Nature, 1990, **344**: 524~ 526
- [3] I.-W. Lyo, Ph. Avouris, Science, 1991, **253**: 173~ 176
- [4] G. Meyer, L. Bartels, S. Zophel *et al*, Phys Rev. Lett, 1997, **78**: 1512~ 1515
- [5] E. J. van Loenen, D. Dijkamp and A. J. Hoeven, Appl Phys Lett, 1989, **55**: 1312~ 1314
- [6] S. Hosoki, S. Hosaka and T. Hasegawa, Appl Surf Sci, 1992, **60/61**: 643~ 647
- [7] A. Kobayashi, F. Grey, R. S. Williams *et al*, Science, 1993, **259**: 1724~ 1726
- [8] C. T. Salling, M. G. Lagally, Science, 1994, **265**: 502~ 506
- [9] J. W. Lyding, T.-C. Shen, J. S. Hubauk *et al*, Appl Phys Lett, 1994, **64**: 2010~ 2012
- [10] Q. J. Gu, N. Liu, W. B. Zhao *et al*, Appl Phys Lett, 1995, **66**: 1747~ 1749
- [11] K. Takayanagi, Y. Tanishiro, S. Takahashi *et al*, Surf Sci, 1985, **164**: 367~ 378
- [12] H. Uchida, D. H. Huang, J. Yoshinobu *et al*, Surf Sci, 1993, **287/288**: 1056~ 1061
- [13] U. Durig, O. Zuger and D. W. Pohl, Phys Rev. Lett, 1990, **65**: 349~ 352
- [14] G. Meyer, S. Zophel and K.-H. Rieder, Phys Rev. Lett, 1996, **77**: 2113~ 2116
- [15] M. T. Cuberes, R. R. Schlittler and J. K. Gimzewski, Appl Phys Lett, 1996, **69**: 3016~ 3018

A t o m i c M a n i p u l a t i o n o n S i (1 1 1) - 7 × 7 S u r f a c e

Yang Haiqiang^{1,2}, Gao Junin¹, Xue Zengquan², Pang Shijin¹

(1 *Beijing Laboratory of Vacuum Physics, Center for Condensed Matter Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

(2 *Department of Radio-Electronics, Peking University, Beijing 100871*)

Received 23 October 1997, revised manuscript received 19 January 1998

Abstract Single atom on Si(111)- 7×7 surface can be extracted out by current pulses, and nanometer-scale grooves can be formed by constant current scan. When the scanning direction is parallel to one of basic vectors of Si(111)- 7×7 surface, the grooves with atomic straight edges can be formed, and these structures are more stable. The atomic manipulation mechanism is discussed.

PACC: 6116P, 6820, 8160C

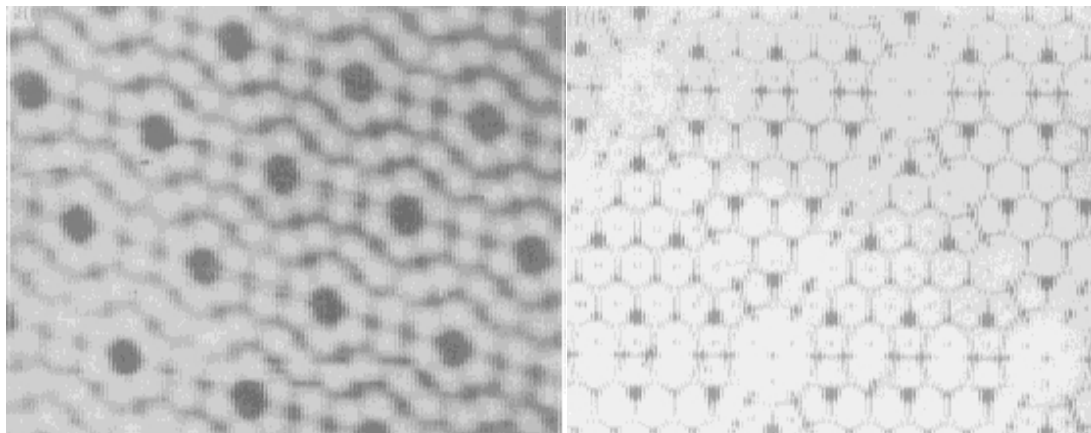


图 1(a) Si(111)-7×7 表面原子结构的 STM 图象
图中的菱形内是 Si(111)-7×7 的原胞,
它由 12 个顶戴原子和一个原子空位构成

图 1(b) Si(111)-7×7 的原子结构模型
它由两个亚单胞构成, 每个亚单胞有 6 个顶戴
原子, 其中右下方的一个亚单胞出现层错,
两个亚单胞之间通过二聚体连接在一起

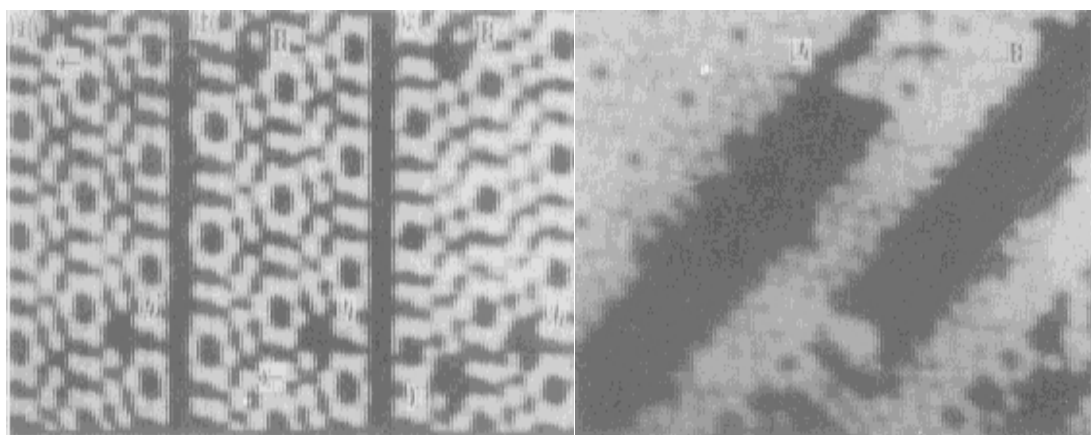


图 2 用电流脉冲法进行
单原子操纵的过程图

图 3 用恒电流扫描法得到的两条具有原子级
平直边界的稳定的人造原子级沟槽结构

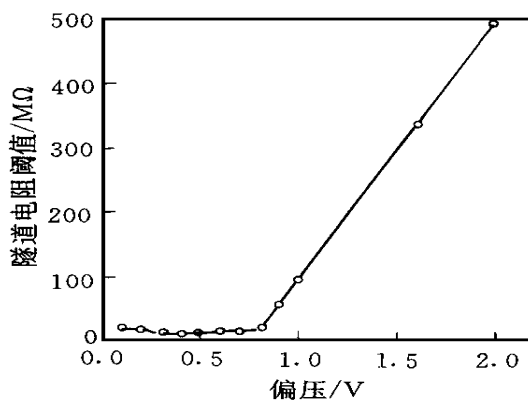


图 4 隧道电阻阈值与偏压的关系曲线