

Si(111)(7×7)表面上 Ge 量子点的 自组织生长*

张永平 闫 隆 解思深 庞世谨 高鸿钧

(中国科学院物理研究所凝聚态物理中心,北京真空物理实验室,北京 100080)

(2001 年 7 月 3 日收到,2001 年 7 月 25 日收到修改稿)

用扫描隧道显微镜研究了 Si(111)(7×7)表面上 Ge 量子点的自组织生长.室温下用固相外延法在硅基底上沉积亚单层的 Ge,然后在适当的温度下退火可以聚集形成有序的 Ge 量子点.由于 Ge 在 Si(111)(7×7)表面选择性的吸附而形成有序的 Ge 量子点.

关键词:锗,硅,扫描隧道显微镜,自组织生长

PACC:6116P,6146,7340L

1 引 言

使用扫描隧道显微镜 (STM) 进行原子操纵构造纳米级表面结构,为一个原子一个原子地创造新的亚稳态结构开辟了道路.然而这种原子操纵技术一次只能构造一个纳米结构,速度太慢限制了它的应用.利用自组织生长可以同时表面形成高密度紧密排列的纳米结构,它们的物理和化学性质可以用常规的表面谱仪测量^[1,2].自组织生长技术已经用于制备 IV 族元素(例如 Si-SiGe)量子点^[3-7],并且对 Si 和 Ge 吸附在 Si(111)-(7×7)表面上的电子结构和晶体结构进行了广泛研究^[8-11].但到目前为止,有序 Ge 量子点的可控生长依然是个难题,如果 Ge 量子点的位置和大小能够精确控制,就有可能得到像量子尺寸效应这样的新的物理性质.

本文描述自组织生长二维有序量子点的一种途径.室温下在 Si(111)(7×7)表面上沉积亚单层 (ML)的 Ge,然后在适当的温度下退火可以形成有序的量子点.由于在 Si(111)(7×7)有层错的半元胞固有的吸引势阱的存在,可以俘获扩散的 Ge 原子而形成尺寸一致规则排列的纳米团簇.

2 实 验

实验是在 Omicron 超高真空扫描隧道显微镜 (UHV-STM)中进行的.所用的样品是 p 型 Si(111)抛光片,电阻率为 1—2 Ω·cm,厚度为 0.50 mm.首先将样品在 800K 加热去气 12h,然后将样品迅速升温到 1400K,随后将样品缓缓降到室温.降温速率小于 1 K/s.重复处理几次可以得到大面积的 Si(111)(7×7)重构结构.Ge 的沉积是在超高真空扫描隧道显微镜的制备室中进行的,Ge 沉积是纯度为 99.9999% 的 Ge 片通过直流加热到 1100K 进行蒸发.硅基底处在室温下,沉积速率大约为 0.005ML/min.对沉积 Ge 的硅样品在室温下进行 STM 成像.

3 结果与讨论

表面原子的扩散是薄膜生长中重要的动力学过程,没有足够的表面移动就不能形成均匀平整的薄膜.表面扩散系数 $D = a^2 k_s$,其中 a 是在表面两个吸附位置间的距离, $k_s \propto \exp\{-V_s/k_B T\}$,其中 V_s 是表面原子迁移的势垒, T 是温度, k_B 是 Boltzmann 常数.在薄膜生长的初期, D 值决定吸附原子找到并加入已有岛或遇到其他吸附原子结合形成晶核前的扩散距离.在低温时,原子的平均扩散距离小,可以

* 国家自然科学基金(批准号 6977001,60071009)资助的课题.

形成大量晶核,而生长成高密度的小团簇.随着温度的提高,原子的平均扩散距离增加,岛的密度降低而聚集成大的团簇.因此,通过控制温度可以控制所形成团簇的尺寸和形状.

为了研究 Ge 原子的扩散过程和退火温度的关系,室温下在 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面上沉积亚单层的 Ge,然后将样品在适当的温度退火.首先,在室温下在 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面上沉积 0.15 ML 的 Ge,其 STM 图像如图 1 所示. $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面上几乎连续覆盖着非晶 Ge 原子层,起伏较大,呈现粒状特征.这些粒状团簇随机地分布在 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 有层错和无层错的两个半元胞内.然后,为了增加 Ge 原子的迁移率以便获得有序排列的量子点,将样品在 500K 退火 10min. Ge 原子通过表面扩散开始聚集.图 2(a) 给出 500K 退火后样品的 STM 图像,Ge 团簇在 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面上有序排列.沿 AA' 线和 BB' 线高度轮廓如图 2(b) 和 2(c) 所示.团簇的尺寸是一致的.我们发现所形成的 Ge 量子点位于 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 单胞的有层错的半元胞内. Cho 和 Kaxiras^[12] 利用密度泛函理论总能计算研究了吸附原子在 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面上的吸附和扩散,引入所谓的“吸引势阱”的概念,说明稳定的吸附位置位于高对称性位置,而不是表面顶戴原子悬挂键的位置.在静止原子周围的“吸引势阱”有效地俘获 Ge 原子形成有序的量子点.

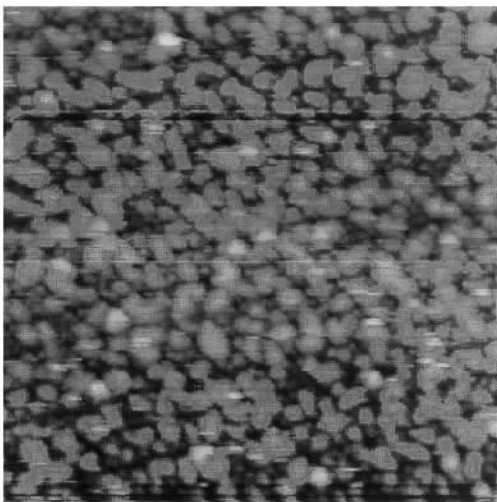


图 1 室温下在 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面上沉积 0.15ML Ge 的占据态 STM 图像,扫描范围 $40\text{nm} \times 40\text{nm}$

将沉积量增加到 0.2ML,控制相同的表面扩散过程也可以得到有序排列的量子点.图 3 给出在 Si

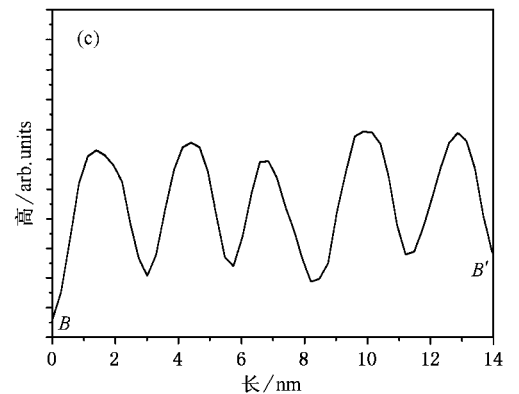
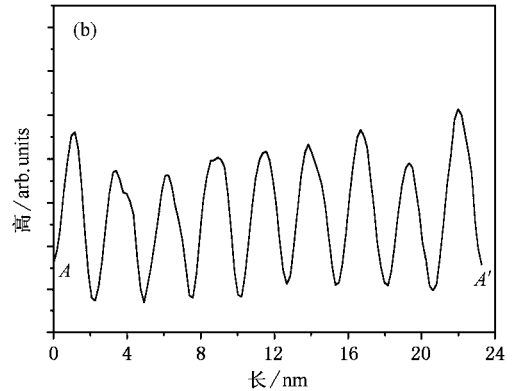
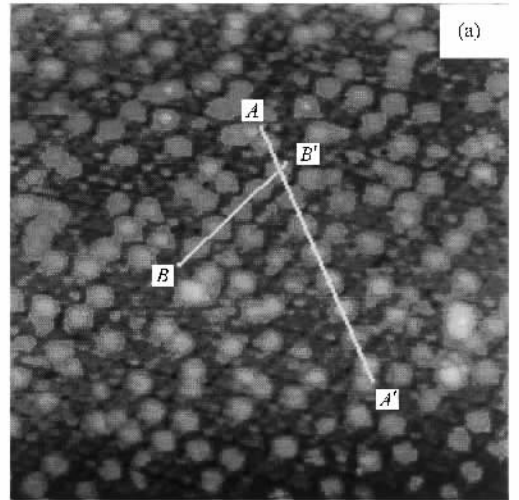


图 2 沉积 0.15ML Ge 经 500K 退火 10min 后的占据态 STM 图像(扫描范围 $40\text{nm} \times 40\text{nm}$) (a), 和沿 AA' 线 (b) 和 BB' 线 (c) 的高度轮廓图

(111)(7x7) 表面沉积 0.2ML Ge 原子并在 500K 退火 10min 的 STM 图像.可以看到,有很多金字塔形的团簇位于有层错的半元胞,少量的圆屋顶形的团簇位于无层错的半元胞,这种分布可能是由于 $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 两个半元胞的吸附能不同所致.在整个实验过程中, $\text{Si}(111)(7 \times 7)$ 表面重构保持完整,

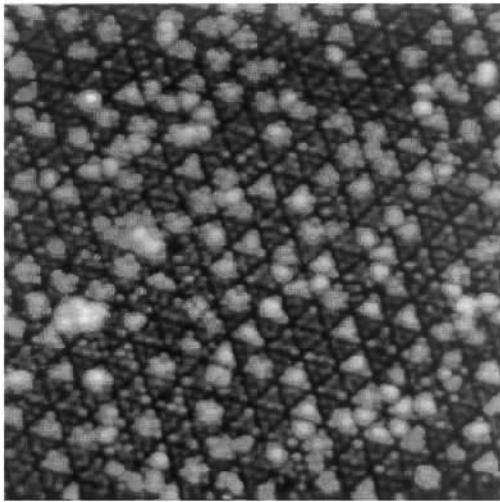


图 3 沉积 0.2ML Ge 经 500K 退火 10min 后的占据态 STM 图像,扫描范围 40nm × 40nm

说明 Ge 团簇形态的变化以至 Ge 团簇的有序分布,是由 Si(111)(7 × 7)表面本征能量状态决定的.

4 结 论

使用扫描隧道显微镜研究了 Si(111)(7 × 7)表面上 Ge 量子点的自组织生长过程.通过控制样品的退火温度,在 Si(111)(7 × 7)表面上可以形成有序的 Ge 量子点.这种控制表面扩散技术有可能为制备半导体量子点提供一种路径,在量子器件应用上具潜在的应用价值.

-
- [1] Brune H , Giovannini M , Bromann K and Kern K 1998 *Nature* **394** 451
- [2] Roder H , Hahn E , Brune H , Bucher J P and Kern K 1993 *Nature* **366** 141
- [3] Kim E S , Usami N and Shiraki Y 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 1617
- [4] Si J J , Yang Q Q , Teng D , Wang H J , Yu J Z , Wang Q M , Guo L W , Zhou J M 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1750 (in Chinese) [司俊杰、扬沁清、滕达、王红杰、余金中、王启明、郭丽伟、周均铭 1999 *物理学报* **48** 1750]
- [5] Yan L *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2132 (in Chinese) [闫隆等 2001 *物理学报* **50** 2132]
- [6] Hibino H , Shimizu N and Shinoda Y 1993 *J. Vac. Sci. Technol.* **A11** 2458
- [7] Shiryayev S Y , Jensen F , Hansen J L , Petersen J W and Larsen A N 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 503
- [8] Stauffer L , Sonnet P and Minot C 1997 *Surf. Sci.* **371** 63
- [9] Sonnet P , Stauffer L and Minot C 1998 *Surf. Sci.* **402-404** 751
- [10] Okada M , Muto A , Ikeda H , Zaima S and Yasuda Y 1998 *J. Cryst. Growth* **188** 119
- [11] Sato T , Kitamura S and Iwatsuki M 2000 *Surf. Sci.* **445** 130
- [12] Cho K and Kaxiras E 1998 *Surf. Sci. Lett.* **396** 261

Self-assembled growth of Ge quantum dots on Si(111)(7×7) surface^{*}

Zhang Yong-Ping Yan Long Xie Si-Shen Pang Shi-Jin Gao Hong-Jun

(Beijing Laboratory of Vacuum Physics , Institute of Physics & Center for Condensed Matter Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

(Received 3 July 2001 ; revised manuscript received 25 July 2001)

Abstract

Self-assembled growth of Ge quantum dots on the Si(111)(7×7) surface has been investigated by using scanning tunneling microscopy (STM). It is found that the deposited submonolayer Ge can aggregate and form ordered Ge quantum dots on the surface through controlling the post-growth annealing temperature. The formation of ordered Ge quantum dots is due to the preferential adsorption sites of Ge on Si(111)(7×7).

Keywords : germanium , silicon , scanning tunneling microscopy (STM) , self-assembling

PACC : 6116P , 6146 , 7340L

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 6977001 , 60071009).