

扫描隧道显微镜对 InAs/GaAs 自组织生长量子点的准原位研究*

赵 谦 封松林 王志明

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室 北京 100083)

摘要 本文报道了用 MBE-SPM 联合系统对 InAs/GaAs 量子点进行准原位研究的初步结果。STM 图像表明,在对 n^+ -GaAs 衬底进行脱氧处理后,通过生长 GaAs 缓冲层能有效的改善表面质量。在缓冲层上继续生长 2 单原子层 InAs 后形成了量子点。SPM 与透射电子显微镜给出的量子点形貌的异同在文中也给出了合理的解释,该研究工作的进一步深入将对自组织生长量子点的生长机理的理解和样品质量的提高有重要意义。

PACC: 7320, 734L, 6116P

1 引言

GaAs 衬底上自组织生长的 InAs 量子点结构^[1],在三个维度上限制了电子的运动^[2],并具有库仑阻塞效应^[3]及许多独特的光电性质,有着诱人的应用前景;无论在基础研究还是在器件应用方面都有相当重要的研究价值,因而引起人们极大的兴趣。为进一步研究这种新型结构的物理性质及其可能的应用,必须首先研究生长这种结构的工艺条件和生长机理^[4],以求得到量子点大小一致、分布均匀、具有所需物理性质的高质量样品。为确定各种生长条件对 InAs 量子点形成过程的影响,并测量最终形成的量子点密度以及形状、大小等形貌特征,国际上已开展了许多工作^[5]。

本文报道了我们用 MBE-SPM 联合系统对 InAs/GaAs 量子点进行准原位研究的结果。与 SEM 的研究结果对比,有许多一致的地方,这说明 SPM 结果的可靠性。对于不完全符合的部分,我们在文中也给出了合理解释。SPM 还给出不少 SEM 无法给出的信息,表现出它在该项研究中独特的优越性。

2 实验

本工作所用设备为 MBE-SPM 联合系统,其中 MBE 部分为 VG 公司 V80H MK II 型

* 国家自然科学基金和国家攀登计划资助项目

赵 谦 男,1973 年出生,硕士生,目前从事低维半导体物理性质研究

封松林 男,1964 年出生,研究员,目前从事低维半导体物理性质研究

王志明 男,1969 年出生,博士生,目前从事低维化合物半导体材料生长研究

1997-04-22 收到,1997-07-18 定稿

分子束外延设备,用来制备所需样品 SPM 部分为 Park Scientific Instruments 公司的 AutoProbe VP 型扫描探针显微设备,两部分通过超高真空管道连接起来,如图 1 所示(见图版 D)。中间有闸板阀分隔,因而保证两部分真空互不影响,可以独立工作。

实验过程中,当样品在 MBE 中生长结束后,迅速从衬底加热器上取下,样品温度从生长温度快速下降至 200 以下,避免了表面原子的扩散,可以认为样品表面形貌被冷冻住,从而使准在位测量成为可能。样品在超高真空条件下可以在 MBE 和 SPM 间双向传输,避免了可能引入的污染和氧化等负效应,确保了结果的可靠性。

经过清洗的 n^+ -GaAs(100) 衬底首先在 SPM 中进行 STM 观测,然后传入 MBE 系统,经 580 脱氧后再传入 SPM 进行 STM 观测;之后再传回 MBE 系统生长 0.4 μm GaAs 缓冲层,生长温度为 600,生长缓冲层后再传入 SPM 进行 STM 观测;观测后再传回 MBE 系统继续在 600 生长 0.1 μm GaAs 缓冲层,然后将生长温度降至 450,生长 2ML 的 InAs,形成量子点,然后传入 SPM 进行 STM 观测。为保证 STM 观测的实现,在生长 GaAs 缓冲层和 InAs 量子点层时均进行掺杂,掺杂元素为 Si,掺杂浓度分别为 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ (GaAs 缓冲层中)和 $3 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ (InAs 量子点中)。

3 实验结果与讨论

3.1 脱氧前后 STM 形貌图

图 2、图 3(见图版 D)分别为脱氧前后衬底表面 STM 形貌图。由两图对比可见经过脱氧后,表面起伏仍然很大(表面最高点与最低点间距均为 10nm 左右),说明表面氧化物较薄,脱氧过程无明显改善表面平整度。

3.2 生长缓冲层后的 STM 形貌图

图 4(见图版 D)为生长缓冲层后的衬底表面 STM 形貌图。与脱氧后的 STM 形貌图相比,表面起伏减小(这幅图中表面最高点与最低点间距为 3nm 左右)。可见生长缓冲层后明显改善了表面质量。在生长过程中同时进行的反射高能电子衍射(RHEED)图像也证明了这一点。

3.3 生长量子点后的 STM 形貌图

图 5 至图 8(见图版 D)均为生长 2ML InAs,形成量子点后用 STM 观测到的表面形貌图。图 5、图 6 观察尺度分别为 1 μm 和 0.5 μm ,由图可见,此时衬底表面已形成量子点,量子点面密度约为 $1.1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 。这一结果与本实验室以前所做的 2.5ML InAs 量子点 TEM 平面像所给出的结果(量子点面密度为 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$)^[4]在量级上相吻合。产生这一差别的原因在于,随着 InAs 层的增厚,量子点面密度增大。

图 7 为观察尺度为 0.1 μm 时的 STM 形貌图,由该图可看出,量子点的尺寸较为均匀,直径约为 20nm。通过改变该图的明暗对比度,可以观察到量子点的截面,其截面不是圆形,而是接近菱形,可见量子点的形状与理论上认为的金字塔形接近。图 8 是图 7 转变来的三维形貌图。可见,量子点的高度为 2~5nm。

图 6、7 所给出的量子点的尺寸与参考文献[4]给出的尺寸不完全一致,这是由于两种测量手段在尺寸指认上的差别造成的,TEM 照片给出的量子点边界一般是对比度最大的地方,即图上侧面斜率最大的地方,而不是实际边缘(量子点的根部);同时 STM 测量时由于针尖的影响,如图 9 所示(见图版 D),给出尺寸比量子点真实直径要大(约为 20nm),大于我

们自己及参考文献[4]给出的 TEM 测得的量子点直径(10nm). 生长量子点后, 量子点会对其下方的 GaAs 层产生作用, 形成一个应变区, 而这一应变区在 XTEM 下也呈黑色(与量子点区相同), 如图 10 所示(见图版 ID), 所以参考文献[4]给出的 XTEM 测得的量子点高度(5nm)要大于我们用 STM 测得的高度(2~ 5nm).

4 结论

采用 SPM 准原位测量技术能有效的观测量子点的生长过程, 并为进一步研究量子点的物理性质提供了强有力的手段, 从而使生长出高质量的、具有良好光电特性的量子点结构成为可能. GaAs 衬底氧化层较薄, 脱氧后无法明显改善表面质量; 生长缓冲层后, 表面质量明显改善; 生长 2ML InAs 后形成量子点, 直径约为 10~ 20nm 之间, 高度为 2~ 5nm, 量子点面密度约为 $1.1 \times 10^{11}/\text{cm}^2$.

参 考 文 献

- [1] S. V. Ghaisas and A. Madhukar, in Processing of the SPIE Symposium on Growth of Advanced Semiconductor Structures (SPIE, Bellingham, WA, 1988), **944**: 16; S. V. Ghaisas and A. Madhukar, J. Vac. Sci. Technol., 1989, **B7**: 264
- [2] M. A. Reed, J. N. Randall, R. J. Aggarwal *et al*., Phys. Rev. Lett., 1988, **60**: 535
- [3] R. C. Ashoori, H. L. Stomer, J. S. Weiner *et al*., Phys. Rev. Lett., 1992, **68**: 3088
- [4] 杨小平, 等, 半导体学报, 1996, **17**: 869~ 872
- [5] 例如: N. P. Kobayashi, T. R. Ramachandran, P. Chen *et al*., Appl. Phys. Lett., 1996, **68**: 3299

In situ, Scanning Tunneling Microscope Studies of InAs/GaAs Self-Organized Quantum Dots

Zhao Qian, Feng Songlin and Wang Zhiming

(National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 22 April 1997, revised manuscript received 18 July 1997

Abstract We present our preliminary results of *in-situ* scanning tunneling microscope investigations on InAs/GaAs self-organized quantum dots with our MBE-SPM combined system. STM images show that, after the deoxidization process on n^+ -GaAs substrate, growing GaAs buffer can effectively improve the surface quality. After growing 2 monolayers InAs on the buffer, quantum dots will be formed. We also give reasonable explanations about the differences between the results given by the STM and TEM measurements. Further research in this field will help us to understand the growth mechanism of the self-organized quantum dots and to make good quality sample.

PACC: 7320, 7340L, 6116P

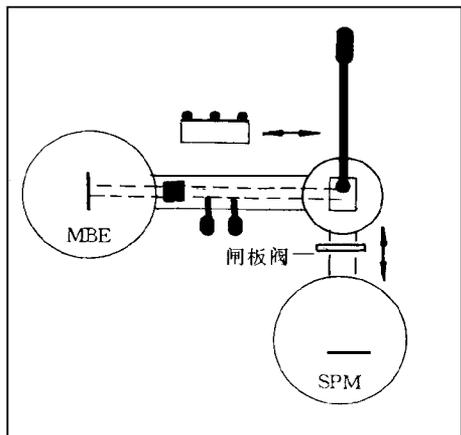


图 1 MBE-SPM 联合系统示意图

图 2 n^+ GaAs(100) 衬底清洗后的 STM 形貌图

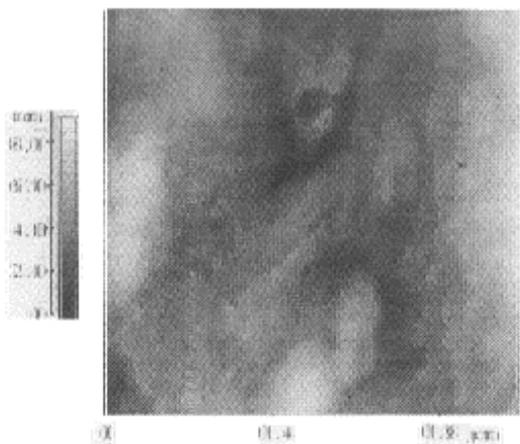


图 3 n^+ GaAs(100) 衬底脱氧后的 STM 形貌图

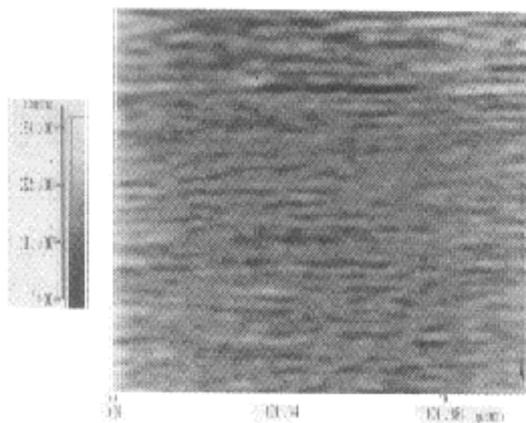


图 4 生长缓冲层后的 STM 形貌图

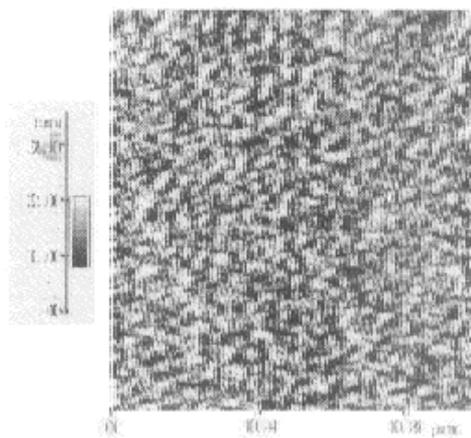


图 5 生长量子点后的 STM 形貌图

观察尺度为 $1\mu\text{m}$.

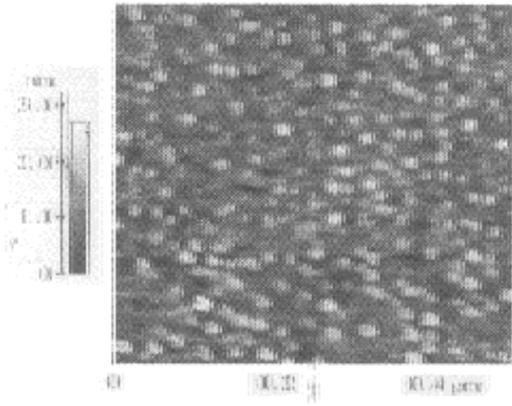


图 6 生长量子点后的 STM 形貌图
观察尺度为 0.5 μm

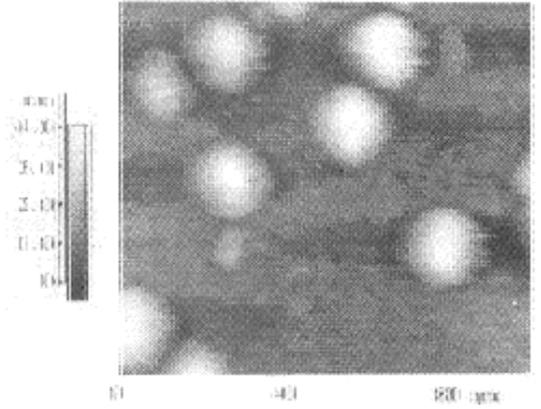


图 7 生长量子点后的 STM 形貌图
观察尺度为 0.1 μm

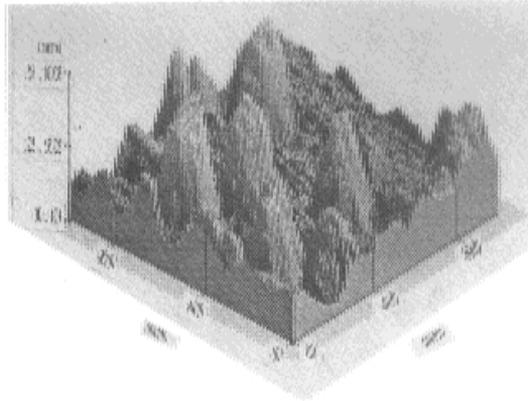


图 8 量子点的三维 STM 形貌图

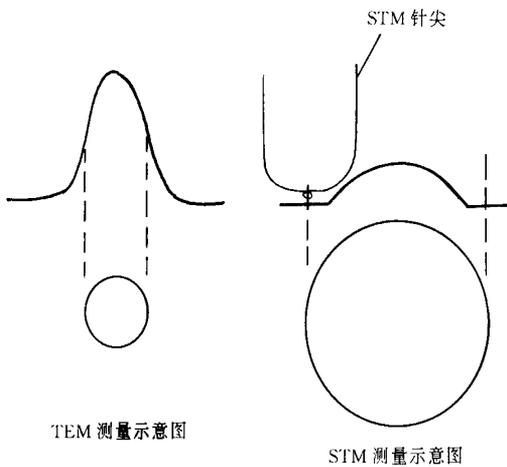


图 9 TEM、STM 测量示意图

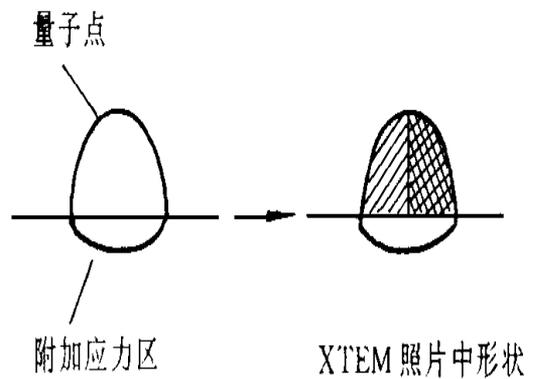


图 10 XTEM 测量示意图