

InAs 量子点的原子力显微镜测试结果分析*

龚 谦 梁基本 徐 波 丁 鼎 王占国

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

裘晓辉 商广义 白春礼

(中国科学院化学研究所 北京 100080)

摘要 我们利用分子束外延(MBE)技术在 GaAs(001)衬底上生长 1.8 个原子层的 InAs, 形成了纳米尺寸的 InAs 量子点. 对 InAs 量子点进行原子力显微镜(AFM)测量, 得到了量子点的高度和横向尺寸的统计分布以及量子点的测量形貌特征. 并且对测量结果利用简单的模型进行了误差的分析.

PACC: 6855, 6116P

1 引言

利用 S-K 生长模式生长无位错纳米尺寸的量子点成为目前的一个研究热点^[1-5]. 量子点激光器的研制成功为量子点的器件应用开辟了广阔的前景. 但是, 由于量子点的尺寸极小, 关于量子点的具体尺寸和形状的测量仍然是没有完全解决的问题. 在量子点的形貌测试中, 原子力显微镜(AFM)是广泛应用的测试手段^[6-9]. Leonard 等^[6]利用原子力显微镜测量 MBE 生长的 InAs/GaAs 量子点, 并报道了量子点的形状为基底尺寸为 20nm, 高为 5nm 的球冠. 但是, AFM 的分辨率受针尖的限制, 测量值往往大于真实值. 在对真实宽度为 2nm 的 DNA 分子的测量中, 测量值为 14nm^[10], 宽度被放大了 7 倍. 对于 InAs/GaAs 量子点的 AFM 测量值的误差分析还未见报道, 而测量误差分析是很有必要的, 因为这些测量值直接影响对量子点电子能态的理论计算^[11]. 本文利用分子束外延(MBE)在(001)-GaAs 衬底上生长 1.8 个原子层 InAs, 制备 InAs 量子点, 对形成的量子点进行了原子力显微镜测试, 并利用简单的模型对测试结果进行分析, 得到了有意义的结果.

2 实验

研究的样品是在 Riber 32P 型 MBE 设备上制备的. 衬底为半绝缘(001)-GaAs, 在

* 本研究项目得到国家自然科学基金和国家“863”高技术计划新材料领域项目的资助

龚 谦 男, 1971 年出生, 博士研究生, 从事半导体材料的 MBE 生长以及材料特性研究, E-mail: qgong@red.semi.ac.cn

1998-03-23 收到, 1998-05-22 定稿

580 除去氧化层后,先生长 300nm 的 GaAs 缓冲层,然后将衬底温度降到 490 ,再生长 1.8 个原子层(1.8ML/s)的 InAs,随后立即将衬底温度降到 150 ,取出样品后保存在充入高纯氮气的样品盒中,以备 AFM 测试.生长中 GaAs 和 InAs 的生长速率分别为 $0.67\mu\text{m}/\text{h}$ 和 $0.1\text{ML}/\text{s}$.生长时生长室背景砷压为 $1.33 \times 10^{-5}\text{Pa}$.生长中我们对高能电子衍射(RHEED)图案进行观察,观测到衍射条纹由线状到点状转变,这对应于生长模式由二维生长到三维生长的转变. AFM 测试设备是 Digital Instruments 公司的 Nanoscope III 型原子力显微镜.我们设计了计算机统计软件对测量结果进行统计分析,并从测量结果中提取扫描线进行定量分析.

3 结果和讨论

图 1 为样品的 AFM 测试形貌图,可以看出,生长 1.8ML/s 的 InAs 可以在 GaAs 表面

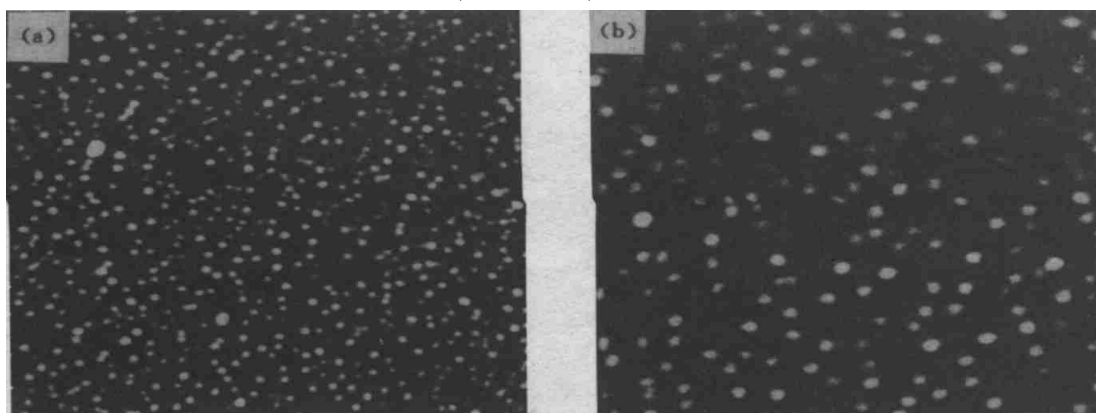


图 1 InAs 量子点的 AFM 照片
扫描尺寸分别为: (a) 1000nm; (b) 500nm.

形成尺寸均匀的量子点.对图中的量子点进行高度和横向尺寸统计可以得到量子点的高度分布和横向尺寸分布图,见图 2.横向尺寸定义为量子点的基底宽度.由图 2(a)可知, InAs 量子点的高度分布在 1.0~ 4.5nm 之间,平均高度为 2.5nm.由图 2(b)可知, InAs 量子点的基底尺寸分布在 20~ 50nm 之间,基底平均尺寸为 32nm.量子点的密度为 $7.6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$.

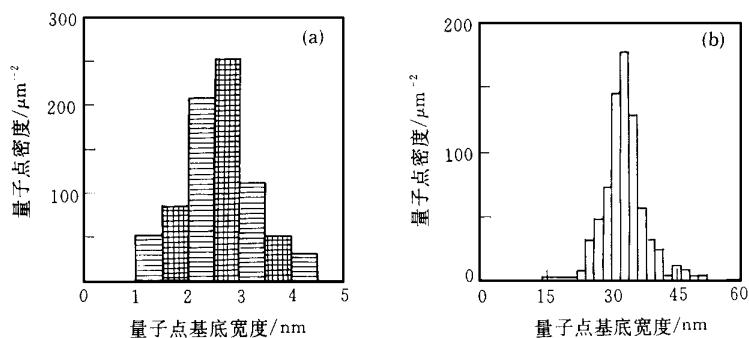


图 2 InAs 量子点的(a)高度, (b)基底宽度的统计分布图

这些测量值和已有的报道是一致的^[6-9]。

在图 3 中, 我们给出量子点的一个典型轮廓图, 即一条通过量子点顶部的扫描线。图中

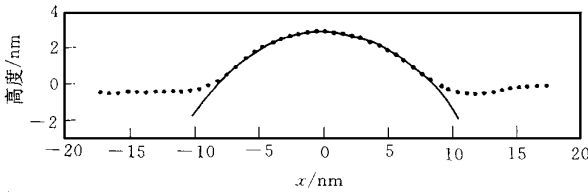


图 3 InAs 量子点的轮廓线
黑点为测量值, 曲线为拟合线

小圆点为测量结果, 曲线为用圆形拟合的结果。可以看出, 拟合曲线和测量结果吻合很好, 拟合的球冠半径为 15nm, 高度为 3nm。据测量结果, 是不是可以肯定量子点的形状应该是这个拟合的球冠呢? 为此, 我们对测量结果进行误差分析。AFM 设备的纵向和横向分辨率的标称值一般为 0.01nm 和 0.1nm, 但是由

于 AFM 的针尖效应, 当被测微粒的尺寸与针尖尺寸相当时, 测出的微粒横向尺寸误差较大。商用 AFM 针尖顶端曲率半径的标称值为 20~ 60nm。假设针尖顶端的形状为球冠, 半径为 R (20~ 60nm), 如图 4(a), 考虑理想情况, 当针尖探测高度为 h , 横向宽度为 0 的理想细杆时, 得到的测量结果是半径的 R , 高度为 h 的球冠。可以证明, 当针尖为任何凸出的形状时, 测量的结果为针尖在竖直面内旋转 180 后尖端的轮廓面。所以, 对于基底尺寸小于 $2\sqrt{2Rh - h^2}$ 的微粒, AFM 不能正确反映其形貌, 仅能测出高度值。根据 Leonard 等的结果, 假设量子点的真实形状是半径为 r , 高为 h 的球冠, 经简单的几何分析可以得到以下的公式

$$r_m = r + R \tag{1}$$

$$W_r = 2\sqrt{2rh - h^2} \tag{2}$$

$$W_m = 2\sqrt{2r_m h - h^2} \tag{3}$$

其中 W_m 为测量半径, R 为 AFM 针尖的曲率半径。在图 4(b) 中画出了这种情况。根据这个模型, $r_m = r + R$, 可见当 r_m 的大小也为 10~ 20nm 时, r 是无法确定的, 测量的形貌也是不可靠的。只有当 $r \gg R$ 时, 才可近似认为 $r_m = r$ 。

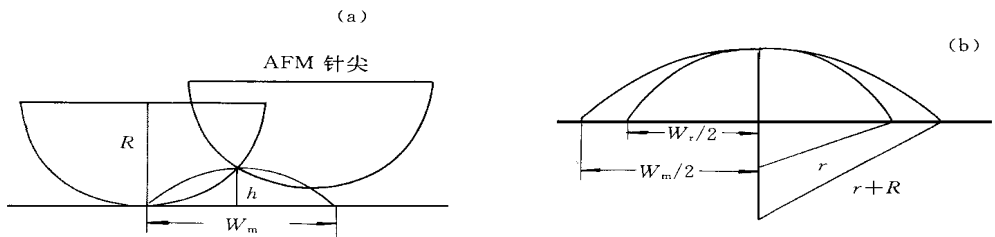


图 4 针尖示意图, 以及对 (a) 理想细杆, (b) 球冠的测量结果示意图

为了定量地讨论横向尺寸测量值的可信度, 以图 4(b) 中的模型为例, 设量子点基底的测量值为 W_m , 基底的实际宽度为 W_r , 假设针尖顶端球面半径为 20nm, 根据公式 (1)~ (3), 在图 5 中给出了 W_r 和 W_m 的关系曲线。可以看出, 量子点的基底越小, 测量结果的误差越大。以 Leonard 等的数据为例, 取 R 为 10nm, 可算出基底尺寸的真实值为 13nm, 测量误差约为 80%。Cusack 等^[11] 的理论计算得出, 当 InAs 量子点的基底尺寸从 5.7nm 变到 12.4nm 时, 量子点的基态辐射复合能量从 1.43eV 变化到 1.11eV。通过光致发光 (PL) 实验

可以得到 InAs 量子点的基态辐射复合能量, 该值为 1.2eV 左右, 对应 InAs 量子点的基底尺寸为 10nm 左右, 这也间接证明了 AFM 的测量结果是偏大的。根据简单的模型分析, 这个误差很大, 而且受具体使用针尖的影响。针尖尺寸在 20~60nm 之间变化时, 误差本身也会发生变化。所以, AFM 测得的量子点基底尺寸的使用应该采取谨慎的态度。

4 结论

我们利用 AFM 对 GaAs(001) 衬底上生长的 InAs 量子点进行了测量, 并且对测量结果利用简单的模型进行了定量的分析。得到以下结论: (1) 在 GaAs 衬底上生长 1.8MLs 的 InAs, 可以得到平均高度为 2.5nm, 密度为 $7.6 \times 10^{10}/\text{cm}^2$ 的 InAs 量子点; (2) 采用球冠模型, 分析了量子点基底尺寸的测量误差, 从而估计测量值的可信度。

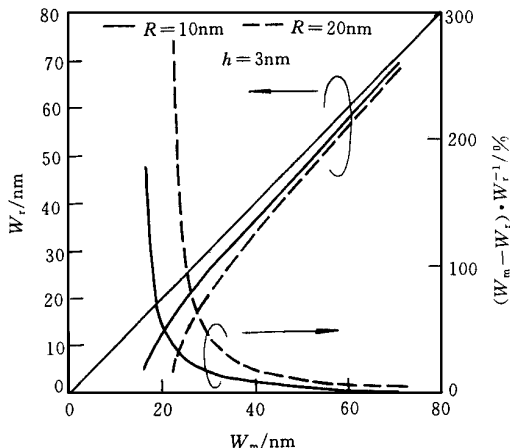


图5 考虑针尖效应AFM 的测量误差图(取球冠模型)

参 考 文 献

- [1] G. S. Solomon, J. A. Trezza, J. S. Harris *et al*, Appl Phys Lett, 1995, **66**: 3161~ 3163
- [2] KohkiMukai, NobuyukiOhtsuka, Hajime Shoji *et al*, Appl Phys Lett, 1996, **68**: 3013~ 3015
- [3] S. Fafard, K. Hinzer, S. Raymond *et al*, Science, 1996, **274**: 1350~ 1352
- [4] D. L. Huffaker, O. Baklenov, L. A. Graham *et al*, Appl Phys Lett, 1997, **70**: 2356~ 2358
- [5] Hajime Shoji, Yoshiaki Nakata, KohkiMukai *et al*, Appl Phys Lett, 1997, **71**: 193~ 195
- [6] D. Leonard, K. Pond, and P. M. Petroff, Phys Rev. B, 1994, **50**: 11687~ 11691.
- [7] J. M. Moison, F. Houzay, F. Barthe *et al*, Appl Phys Lett, 1994, **64**: 196~ 198
- [8] N. P. Kobayashi, T. R. Ramachandran, P. Chen *et al*, Appl Phys Lett, 1996, **68**: 3299~ 3231.
- [9] Hao Lee, Roger R. Lowe-Webb, Weidong Yang *et al*, Appl Phys Lett, 1997, **71**: 2325~ 2327.
- [10] T. Thundat, X. Y. Zheng, S. L. Sharp *et al*, Scanning Microscopy, 1992, **6**: 903~ 906
- [11] M. A. Cusack, P. R. Briddon and M. Jaros, Phys Rev. B, 1996, **54**: R2300~ R2304

Analysis of Atomic Force Microscopic Results of InAs Quantum Dots

Gong Qian, Liang Jiben, Xu Bo, Ding Ding, Wang Zhanguo

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Qiu Xiaohui, Shang Guangyi, Bai Chunli

(Institute of Chemistry, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Atomic force microscopy (AFM) measurements of nanometer islands formed by 1.8 monolayers InAs by molecular beam epitaxy have been carried out. The statical distribution of lateral size and height of the grown dots was obtained by the computer program. A simple model is proposed to analyze the deviation of the measured value from the real value of the base width of InAs islands.

PACC: 6855, 6116P