

# 自组织 SiGe 量子环的生长与形貌维持

李防化<sup>†</sup> 蒋最敏

(复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

**摘要:** 研究了 640°C 部分覆盖 SiGe 量子点时量子点向量子环的转变. 从应变的角度解释了量子环的形成机制. 研究发现在 350°C 以下覆盖量子环时可以使量子环形貌得到很好的维持. 从动力学的角度解释了低温下覆盖 SiGe 量子环时其形貌得到维持的原因.

**关键词:** 量子点; 量子环; SiGe; MBE

**PACC:** 8100; 8115N; 6855

**中图分类号:** O484.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)S0-0148-03

## 1 引言

由于量子点<sup>[1,2]</sup>在基础研究和光电器件中的潜在应用近年来引起人们越来越多的关注,是目前比较热门的研究领域之一. 研究发现在适当的条件下部分覆盖量子点可以形成量子环<sup>[3,4]</sup>. 作为一种新的纳米结构,量子环具有更高的振动强度<sup>[5]</sup>,较高的发光峰位<sup>[6]</sup>,环状电子结构<sup>[7]</sup>等量子点所无法比拟的物理特性. 这使得量子环在光电器件应用方面有着更加广阔的前景,从而预示了其在工业中潜在的巨大应用价值. SiGe 量子环由于与现在的半导体工艺相兼容,在器件应用方面更是有着得天独厚的优势,而量子环在做成器件时必须埋在 Si 中,因此对 SiGe 量子环生长机制及其形貌维持的研究具有重要的意义. 本文主要介绍 SiGe 量子环的制备、形成机制以及如何覆盖 Si 时维持量子环的形貌.

## 2 实验

样品的制备是在一台型号为 Riber-EVA32 超高真空固源 Si 分子束外延系统上完成. 衬底采用的是电阻率  $1\sim 10\Omega\cdot\text{cm}$  的 p 型 Si(100)抛光片. 经过 Shiraki 方法化学处理过的衬底在生长室中 1000°C 加热 10min, Si 衬底表面起保护作用的氧化膜被蒸发掉从而获得清洁的表面. 量子环的制备如下: 首先 640°C 生长 50nm 厚的 Si 缓冲层, 然后利用两步生长法生长尺寸比较均匀的 SiGe 量子点<sup>[8]</sup>, 量子点生长完毕后在 640°C 覆盖 1.46nm 的 Si 即可形成量子环. 有几块量子环样品分别在不同的温度下覆盖不

同厚度的 Si 以研究覆盖温度和覆盖层厚度对量子环形貌维持的影响. Si 和 Ge 的生长速率分别为 0.03 和 0.01nm/s. 所有的样品在生长完毕后迅速降至室温. 样品表面形貌的观察在 NT-MDT 公司型号为 P47-SPM-MDT 的原子力显微镜(AFM)上完成.

## 3 结果与讨论

图 1 系统地说明了 SiGe 量子点向 SiGe 量子环的转变. 刚刚长好的量子点是穹形的, 其面指数为  $\{113\}$ ; 640°C 下覆盖 0.32nm 层厚 Si 时 SiGe 量子点底部直径变大, 高度变小, 同时面指数变为  $\{104\}$ <sup>[9]</sup>, 即转变成  $\{104\}$  面金字塔形量子点; 当覆盖 0.77nm 层厚 Si 时 SiGe 量子点变为平台结构的量子点, 在 Si 的覆盖厚度为 1.46nm 时, 量子点转变成量子环.

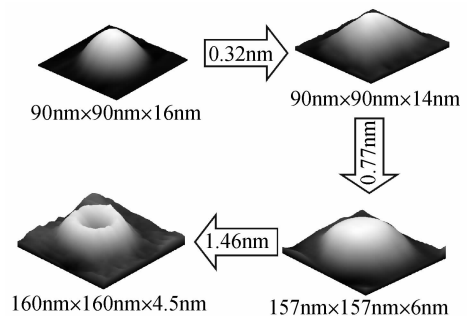


图 1 640°C 单个量子点到量子环的形貌转变. 图中分别标明了各个样品的扫描范围.

Fig.1 Shape change of a single SiGe quantum dot from quantum dot to quantum ring at a temperature of 640°C. The scan scales are indicated in each image.

<sup>†</sup> 通信作者. Email: fanghuali@fudan.edu.cn

2005-12-09 收到, 2006-01-05 定稿

目前对量子环形成机制的解释主要有两种观点.一种基于动力学的考虑<sup>[10]</sup>,另外一种基于热力学的考虑<sup>[11]</sup>.然而 SiGe 量子点是通过 S-K 模式形成的,是一种应变释放的过程.通过 X 射线衍射实验可以发现, SiGe 量子点处于一种应变状态<sup>[12]</sup>,因此从应变的角度来解释 SiGe 量子环的形成机制更加合理.从量子点底部到顶部其应变逐渐减小,这样晶格常数在量子点顶部接近 Ge 而在底部接近 Si,量子点核心部分应变最大.对于没有覆盖 Si 的量子点从量子点边缘到顶部其晶格常数从小变大,对 Si 来说是一个从晶格匹配到晶格失配的过程.当 Si 覆盖到 SiGe 量子点上时,量子点顶部相对于 Si 来说是晶格失配的,因而 Si 原子不易在顶部稳定下来,在较高的温度下会表面迁移到晶格更加匹配的量子点边缘附近,同时覆盖到润湿层(wetting layer)上的 Si 也会有一部分迁移到量子点的边缘<sup>[9]</sup>.这样由于新覆盖的 Si 的聚集,在量子点顶部的 Ge 与边缘部分的 Si 之间就形成了一个浓度梯度,由于 Si 在量子点的边缘附近晶格匹配,使得覆盖的 Si 更适于在量子点的边缘部分聚集,由于浓度梯度的作用量子环顶部的 Ge 就会通过表面扩散向量子点的边缘甚至润湿层迁移并与那里的 Si 互混.与此同时,原来处于量子点核心部分现暴露于量子点表面的 Ge 比原来位于表面的 Ge 处于更大的应变状态,从而更加容易迁移.覆盖的 Si 越大,形成的浓度梯度越大,量子点核心部分的 Ge 的迁移量就越多,从而在一定的 Si 覆盖厚度下形成量子环.在低温下覆盖量子点并没有观察到量子点到量子环的转变<sup>[13]</sup>,这是因为表面扩散对量子环的形成起着非常重要的作用.而表面扩散又是一个温度敏感的过程.

图 2 为量子环在不同温度下覆盖不同厚度 Si 的样品的 AFM 图.由图可见,在 200, 300, 350°C 覆盖 2nm 的 Si 层时,样品表面仍然是量子环的形貌.480°C 下覆盖 2nm Si 层时就几乎观察不到任何量子环形貌.在 300°C 下覆盖 7nm Si 层时样品仍能保持量子环的形貌.因此 350°C 以下覆盖量子环时量子环的形貌能够维持得很好.图 3 为对应于图 2 中各样品的剖面图,更加直观地说明了覆盖温度和覆盖层厚度对量子环形貌维持的影响:350°C 以下覆盖量子环时量子环形貌能够维持得很好,而覆盖的 Si 层厚度并不对量子环的形貌产生任何影响.

Rastti<sup>[13]</sup>在讨论 SiGe 量子点形貌维持时认为:低温下 Si, Ge 互混,表面扩散,表面偏析等过程基本上都被抑制,从而实现了量子点的形貌维持.类似地,低温覆盖量子环时, Si, Ge 互混、表面扩散、偏析等在覆盖 Si 时能引起量子环形貌发生变化的过程都被抑制住,从而可以实现 SiGe 量子环的形貌维持.而高温下由于这些过程的作用使得量子环的形

貌维持很难实现.

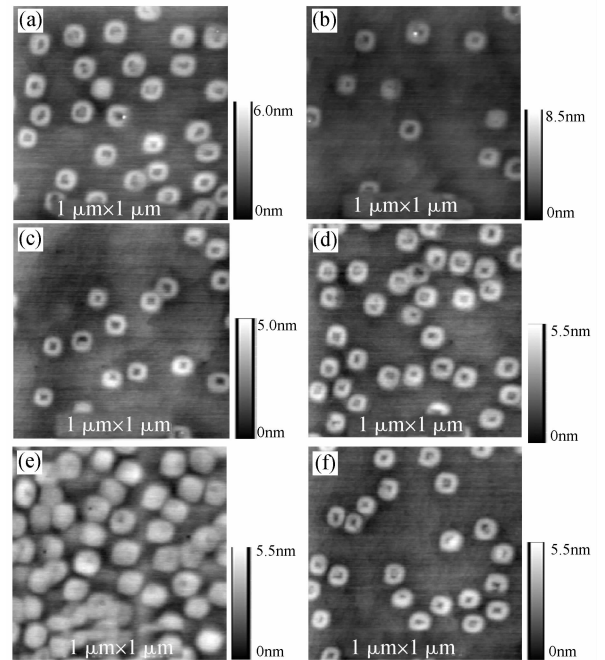


图 2 (a)没有覆盖 Si 层的量子环的 AFM 图;(b),(c),(d),(e)量子环分别在 200,300,350 和 480°C 被覆盖 2nm Si 层以后的 AFM 图;(f) 300°C 下覆盖 7nm Si 层后样品的 AFM 图

Fig.2 (a) AFM images of as-grown SiGe quantum rings;(b),(c),(d),(e) AFM images of SiGe quantum rings capped with 2nm Si at temperatures of 200°C, 300°C, 350°C, and 480°C, respectively;(f) AFM images of SiGe quantum rings after capping with 7nm Si at a temperature of 300°C

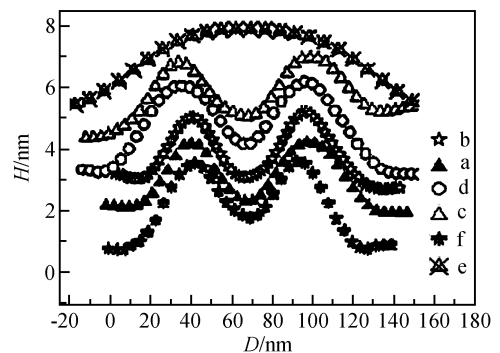


图 3 图 2 中各样品的剖面图 a,b,c,d,e,f 分别对应于图 2 中的各个样品编号.

Fig.3 Corresponding cross-sectional profiles of the samples in Fig. 2

## 4 结论

本文从应变的角度系统地分析了 SiGe 量子环的形成机制,640°C 部分覆盖 SiGe 量子点时量子点可以转变成量子环.研究发现覆盖 Si 时的温度对量

子环的形貌维持起着至关重要的作用:350°C 以下覆盖量子环时量子环形貌能维持得很好。

### 参考文献

- [ 1 ] Medeiros-Ribeiro G, Bratkovski A M, Kamins T I, et al. Shape transition of germanium nanocrystals on a Si(001) surface from pyramids to domes. *Science*, 1998, 279:353
- [ 2 ] Ross F M, Tromp R M, Reuter M C. Transition states between pyramids and domes during Ge/Si island growth. *Science*, 1999, 286:1934
- [ 3 ] Cui J, He Q, Jiang Z M, et al. Self-assembled SiGe quantum rings grown on Si(001) by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2003, 77:1623
- [ 4 ] García J M, Medeiros-Ribeiro G, Schmidt K, et al. Intermixing and shape changes during the formation of InAs self-assembled quantum dots. *Appl Phys Lett*, 1997, 71:2014
- [ 5 ] Pettersson H, Warburton R J, Lorke A, et al. Excitons in self-assembled quantum ring-like structures. *Physica E*, 2000, 6:510
- [ 6 ] Granados D, García J M, Ben T, et al. Vertical order in stacked layers of self-assembled In(Ga)As quantum rings on GaAs(001). *Appl Phys Lett*, 2005, 86:071918
- [ 7 ] Lorke A, Luyken R J, Govorov A O, et al. Spectroscopy of nanoscopic semiconductor rings. *Phys Rev Lett*, 2000, 84:2223
- [ 8 ] Jiang W R, Qin J, Jiang Z M, et al. A two-stage molecular beam epitaxial growth method to fabricate small and uniform Ge quantum dots on Si(100). *J Cryst Growth*, 2001, 227(8):1106
- [ 9 ] Wu Y Q, Li F H, Jiang Z M, et al. Shape change of SiGe islands with initial Si capping. *Appl Phys Lett*, 2005, 87:223116
- [ 10 ] Songmuang R, Kiravittaya S, Schmidt O G. Shape evolution of InAs quantum dots during overgrowth. *J Cryst Growth*, 2003, 249:416
- [ 11 ] Blossey R, Lorke A. Wetting droplet instability and quantum ring formation. *Phys Rev E*, 2002, 65:021603
- [ 12 ] Jiang Z M, Jiang X M, Jiang W R, et al. Lattice strains and composition of self-organized Ge dots grown on Si(001). *Appl Phys Lett*, 2000, 76:3397
- [ 13 ] Rastelli A, Müller E, Von Känel H. Shape preservation of Ge/Si(001) islands during Si capping. *Appl Phys Lett*, 2002, 80:1438

## Growth and Shape Preservation of Self-Assembled SiGe Quantum Rings

Li Fanghua<sup>†</sup> and Jiang Zuimin

(National Key Laboratory of Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The shape transformation from quantum dots (QDs) to quantum rings (QRs) at Si capping temperature of 640°C is investigated. A mechanism based on strain energy relief is suggested to explain the QD to QR shape transformation. Successful shape preservation of SiGe QRs is obtained by capping QRs at temperatures below 350°C. A kinetic mechanism is suggested to explain the shape preservation of SiGe QRs at low temperature capping.

**Key words:** quantum dot; quantum ring; MBE; SiGe

**PACC:** 8100; 8115N; 6855

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0148-03

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: fanghuali@fudan.edu.cn

Received 9 December 2005, revised manuscript received 5 January 2006