

硼原子对 Si(100) 衬底上 Ge 量子点生长的影响*

周星飞 施 斌 蒋伟荣 胡冬枝 樊永良 龚大卫 张翔九 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: 研究了硼原子对 Si(100) 衬底上 Ge 量子点自组织生长的影响. 硼原子的数量由 0 单原子层变到 0.3 单原子层. 原子力显微镜的观察表明, 硼原子不仅对量子点的大小, 而且对其尺寸均匀性及密度都有很大影响. 当硼原子的数量为 0.2 单原子层时, 获得了底部直径为 $60 \pm 5 \text{ nm}$, 面密度为 $6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 且均匀性很好的 Ge 量子点. 另外, 还简单讨论了硼原子对 Ge 量子点自组织生长影响的机制.

关键词: 量子点; Ge; 生长

PACC: 6855; 7320; 6820

中图分类号: O485 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)08-0765-05

Influence of Boron Atom on Growth of Ge Quantum Dots on Si(100)*

ZHOU Xing-fei, SHI Bin, JIANG Wei-rong, HU Dong-zhi,
FAN Yong-liang, GONG Da-wei, ZHANG Xiang-jiu and JIANG Zui-min

(Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Received 8 July 1999, revised manuscript received 20 October 1999

Abstract: The influence of boron atoms on the growth of self-organized Ge quantum dots (QDs) on Si(100) substrate has been studied by atomic force microscopy (AFM). The amount of boron atoms varies from 0 monolayer (ML) to 0.3 ML. It is shown boron atoms exert a great influence on the size, the uniformity and the density of Ge QDs. When the amount of boron atoms is 0.2 ML, uniform Ge QDs are achieved with the average base diameter 60 nm and area-density $6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$. In addition, the mechanism is also discussed about the boron atoms on the growth of Ge QDs.

* 国家自然科学基金资助项目(69776010), 教育部优秀年轻教师基金资助和八六三计划新材料领域资助[Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69776010, Outstanding Young Teacher Foundation of Education Ministry and New Material Area of 863 Plan].

周星飞 男, 1975 年出生, 硕士研究生, 从事 SiGe 材料的生长和结构表征的研究[ZHOU Xing-fei, male, born in 1975, Master Postgraduate, working with the research on growth of SiGe materials and structures].
1999-07-08 收到, 1999-10-20 定稿

Key words: quantum dots; Ge; growth

PACC: 6855; 7320; 6820

Article ID: 0253-4177(2000)08-0765-05

1 引言

在硅衬底上自组织生长的 Ge 量子点在 Si 基光电子、微电子或单电子器件的研制和集成中可望有较大的应用,从而引起了人们广泛的兴趣. 其中一个比较关键的问题是如何制备小尺寸并且均匀性好的量子点,只有在这种情况下量子限制效应才能被观察到. 为了实现这一点,已有一些生长技术和方法的报道^[1-3]. 最近 Chayam 等人^[4]用 CVD 的方法研究了掺硼对 Ge 量子点形成的影响,发现掺入一定量的硼原子能减小量子点的尺寸,但它的均匀性没有改善甚至变差了. 本文首次用固源分子束外延的方法,研究了硼原子对 Ge 量子点生长的影响. 在适当数量的硼原子参与下,获得了小尺寸高密度均匀性较好的 Ge 量子点.

2 实验

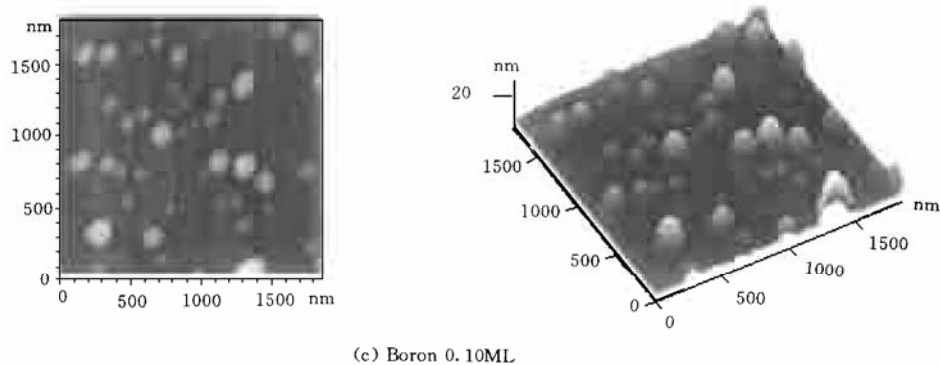
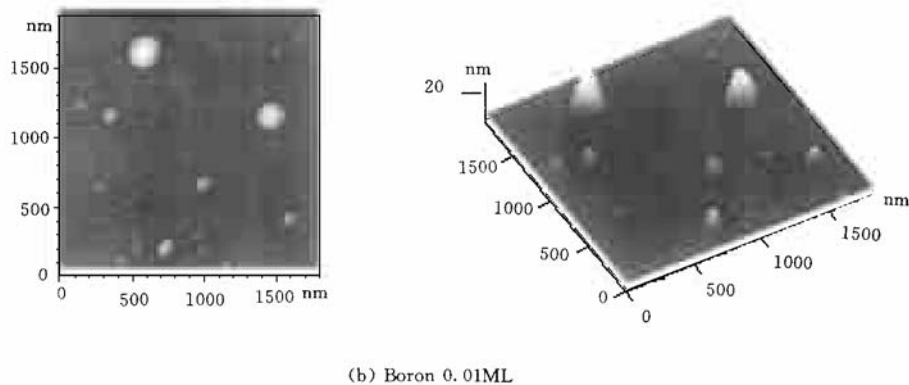
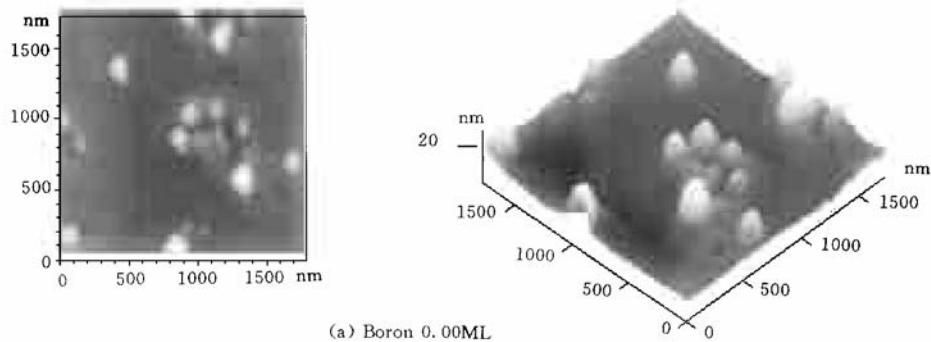
样品的制备是在一台型号为 Riber-EVA 32 超高真空固源 Si 分子束外延系统上完成的. 使用的衬底为 N 型 Si(100) 片,电阻率为 $1-5\Omega \cdot \text{cm}$. 衬底采用标准的 Shiraki 方法清洗. 样品生长过程如下: 首先生长了 30nm 厚的 Si 缓冲层,然后沉积 0.00(样品 A)、0.01(样品 B)、0.10(样品 C)、0.18(样品 D)、0.20(样品 E) 和 0.30(样品 F) 单原子层的硼原子,最后生长 1.2nm 厚的 Ge 层. 生长速率为 0.02nm/s,生长温度为 600°C. 生长结束后用高能电子衍射(RHEED)观察样品表面. 样品 A、B 的 RHEED 图样是 2×1 再构线状叠加上较模糊的小箭头,样品 C、D、E 的 RHEED 图样相似,为 2×1 再构线状叠加上明显的箭头,样品 F 在 1×1 线状上出现了断点. 样品表面形貌的观察是在 NT-MDT 公司的型号为 P47-SPM-MDT 的原子力显微镜上完成的,采用接触模式.

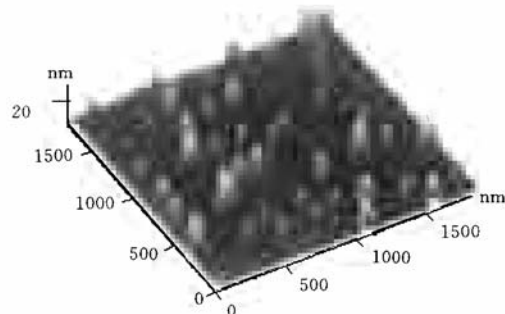
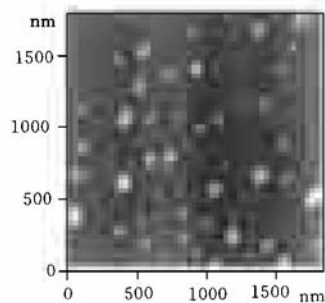
3 结果与讨论

图 1 为 6 个量子点样品的 AFM 图. 当在 Si 缓冲层上覆盖的硼原子数量大于 0.01ML 时,量子点的形貌才有较明显变化. 图 2 为量子点的尺寸与密度随硼原子数量的变化曲线. 随着硼原子表面覆盖度的增加,量子点的密度随之增加,而且平均尺寸逐步减小. 当硼原子的覆盖度接近 0.2ML 时,量子点的大小表现为两种典型的尺寸. 当硼原子的覆盖度为 0.2ML 时,量子点的尺寸变得更小,均匀性更好,密度更大. 大的量子点的底部直径为 $60 \pm 5\text{nm}$,高度约为 12nm,面密度为 $6 \times 10^9\text{cm}^{-2}$. 小的量子点的底部直径为 $3 \pm 0.3\text{nm}$,高度约为 2nm. 当硼原子的覆盖度进一步增加到 0.3ML 时,量子点的尺寸变大了,均匀性也变差了.

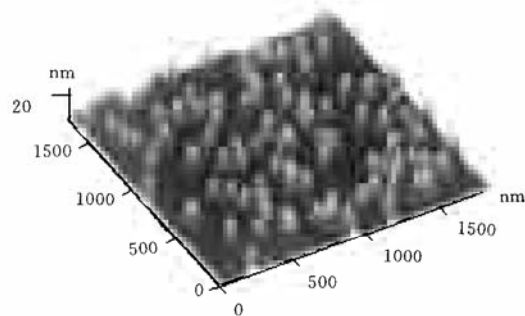
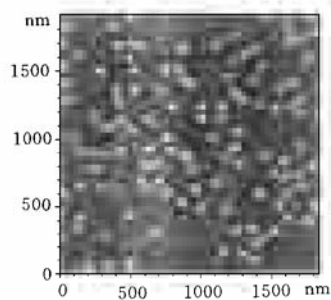
关于掺硼的量子点的生长已有文献报道,Chayam 等人^[4]用 CVD 的方法生长了掺硼的 Ge 量子点,其底部平均直径约为 60nm,与不掺硼的 Ge 量子点相比,其尺寸虽然减小了,但其均匀性却从 $\pm 15\%$ 变到 $\pm 18\%$. 他们认为硼原子的参与使量子点尺寸变小可能是由于硼的原子半径比 Ge 和 Si 的原子半径都小,掺入一定量的硼原子减小了晶格失配,减小了表面自由能,而自由能的降低有利于形成小尺寸的量子点^[4]. 对于缓冲层表面覆盖硼原子的 Ge 量子点的形成主要受两方面的影响^[5],一方面 Ge 和 Si 是晶格失配的材料(失配度 4%),并且 Ge 的表面自由能小于 Si,在 Si(100)衬底上外延生长 Ge 层是典型 Stranski-Krastanov(SK)的生长模式. 即在生长初期是二维层状生长,形成应变的 Ge 浸润层,随着生长厚度的增加,其应变能逐渐增加,当生长的 Ge 层厚度超过临界厚度(一般为 3—5 单原子层)时,它将变为三维岛状生长来释放应变^[5,6],从而形成如图 1 所示的岛状结构. 另一方面,预先淀积的硼原子将影响外延 Ge 层的应变,因此岛状结构将受硼原子的影响,随着硼原子的量不同而发生变化. 正如文献报道的那样,如果在 Si 的缓冲

层上淀积 0.1ML 的碳原子, 将在表面产生应力场^[7]. 在 Si 缓冲层表面覆盖的硼原子同样将产生表面应力场, 这将影响随后 Ge 层量子点的形成和生长. 在淀积 Ge 层之前覆盖在 Si 缓冲层上的硼原子可能首先形成了二维岛, 从而在表面也建立了二维平面上调制的应力场, 部分补偿了随后在硼原子上面生长的 Ge 层的应变. 按经典成核生长理论, 淀积在缓冲层上的二维硼岛经历了成核、生长和岛与岛的互连的过程. 如果沉积的硼原子数量很少(小于 0.01ML), 形成的二维硼原子的晶核就很少, 相应的二维硼岛也很少, 对随后生长的量子点基本没有影响. 如果硼原子的数量过多(大于 0.3ML), 硼原子的二维岛就有可能相互联接起来, 在上面淀积的 Ge 层受到的由硼原子产生的应变场在二维平面也就很不均匀, 从而受其影响所形成的量子点均匀性也就比较差, 并且尺寸显得很大. 只有在合适的覆盖度下才能形成尺寸较均匀的二维硼岛.

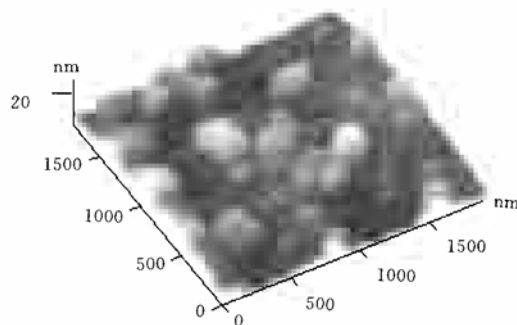
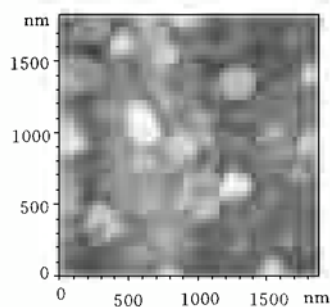




(d) Boron 0.18ML



(e) Boron 0.20ML



(f) Boron 0.30ML

图 1 在不同硼原子覆盖度下生长的量子点的 AFM 图 ($1.6\mu\text{m} \times 1.6\mu\text{m}$)

(a) 0.00ML、(b) 0.01ML、(c) 0.10ML、(d) 0.18ML、(e) 0.20ML、(f) 0.30ML

FIG. 1 AFM Diagram of QDs Grown on Different Boron Atom Covered Degree ($1.6\mu\text{m} \times 1.6\mu\text{m}$)

正如文献所报道的,在由Ⅲ族元素覆盖的 Si(111) 晶面上同质外延分数单原子 Si 层,可以形成较均匀的二维 Si 岛^[8]. 这种均匀的二维硼岛在表面产生了调制的应力场,它在二维平面上有较均匀的分布,从而受其影响形成的量子点也就比较均匀.

由于缺乏量子点生长过程中在位观察的手段,以上关于缓冲层上覆盖的硼原子对 Ge 量子点生长影响

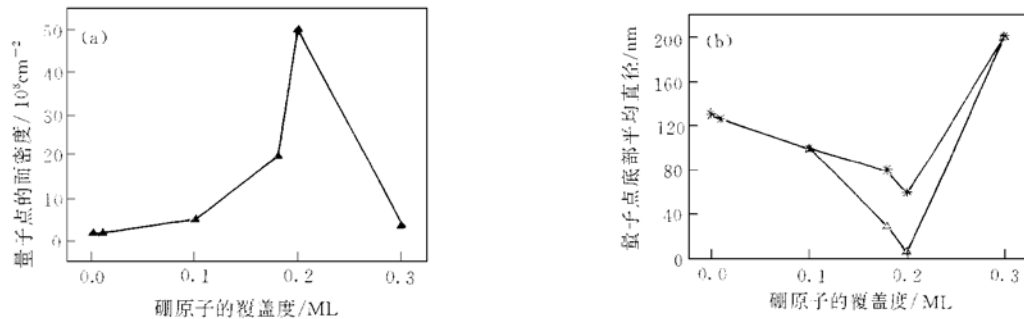


图2 量子点的密度随硼原子覆盖度的变化(a), 量子点的底部平均直径随硼原子覆盖度的变化(b)
(Δ 表示小的量子点, * 表示大的量子点)

FIG. 2 Changing of QDs Density with Covered Degree of Boron Atoms (a) and Changing of Average Diameter at Bottoms of QDs with Covered Degree of Boron Atoms (b)

的讨论是很粗略的, 许多细节目前无法弄清, 仍需要很多工作包括扫描隧道显微镜在位观察; 硼原子的二维岛形成; 生长随温度的变化; Ge 岛成核位置与二维硼岛位置的关系, 才能进一步弄清楚硼原子对 Ge 量子点生长影响的机制。

4 结论

在 600°C 下利用固源分子束外延自组织生长了由表面活化剂硼原子参与的 Ge 量子点. 研究了硼原子的不同覆盖度对 Ge 量子点的尺寸、密度及均匀性的影响. 在一定的覆盖度下 (0.2 ML) 得到了小尺寸高密度及均匀性较好的 Ge 量子点. 同时, 简单讨论了硼原子对 Ge 量子点生长影响的机制。

参 考 文 献

- [1] L. Kubler, D. Dentel, J. L. Bischoff, C. Ghica and J. Wernckmann, Appl. Phys. Lett., 1998, **73**: 1053.
- [2] R. Leon, S. Fafard, D. Leonard, J. L. Merz and P. M. Petroff, Appl. Phys. Lett., 1995, **67**: 521.
- [3] C. S. Peng, Q. Huang, W. Q. Cheng and J. M. Zhou, Phys. Rev. B, 1998, **57**: 8805.
- [4] Chayan Kumar Seal, Dean Samara and Sanjay K. Banerjee, Appl. Phys. Lett., 1997, **71**: 3546.
- [5] Y. W. Mo, D. E. Savage and M. G. Lagally, Phys. Rev. Lett., 1990, **65**: 1020.
- [6] M. Hammar, F. K. LeGoues, J. Tersoff and R. M. Tromp, Surf. Sci., 1996, **349**: 129.
- [7] O. Leifeid, E. Müller and D. Grützmacher, Appl. Phys. Lett., 1999, **74**: 994.
- [8] Bert Voigtlander, Andre Zinner, Thomes Weber and Hans P. Bonzel, Phys. Rev. B, 1995, **51**: 7583.