

In 离子掩模注入 GaAs(001)衬底的均匀有序纳米团簇的形成和扩散*

周慧英[†] 曲胜春 刘俊朋 王占国

(中国科学院半导体研究所 材料科学重点实验室, 北京 100083)

摘要: 离子注入技术是一种重要的制备低维量子结构的方法, 它能通过精确控制注入能量、剂量以及注入温度等形成有序纳米团簇。我们利用有序的阳极氧化铝模板作为掩模板在 GaAs(001)衬底上进行 In 离子选择性注入以及快速热退火, 获得了均匀有序的纳米团簇, 采用原子力显微镜研究了量子点随温度变化的形貌变化特征, 观察到注入吸附原子在衬底的扩散随温度变化而加快, 退火温度达到 680°C 时, 沿 [1̄10] 方向的扩散要比 [110] 方向扩散快, 而且呈现各向异性。

关键词: 离子注入; 锡离子; 各向异性; 扩散

PACC: 7280E; 6170T; 7530G

中图分类号: TN304.2⁺3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0208-03

1 介绍

离子注入技术是近 20 年来在国际上迅速发展的一种表面改性技术, 它在化合物半导体掺杂改性^[1]和低维结构材料的制备中^[2,3]都获得了广泛的应用。同时 GaAs 基材料在电学器件和光学器件上有广泛应用, 制备 GaAs 基低维结构材料也是目前研究的热点^[4~6]。离子注入技术是一种重要的制备 GaAs 基低维结构材料的方法, 它通过精确控制注入能量、剂量以及注入温度等形成量子点。但离子注入方法制备的 GaAs 基低维结构材料是无序的, 不能精确控制注入离子的位置。本论文利用有序的阳极氧化铝模板作为掩模板在 GaAs(001)衬底上进行高能离子注入以及退火, 对离子束精确定位, 获得了均匀有序的纳米团簇。采用原子力显微镜(AFM)观察了量子点随温度的形貌变化特征, 观察到吸附原子在衬底的扩散随温度变化而加快, 而且呈现各向异性。

2 实验

利用 40V 电压, 溶度是 0.3M 的草酸溶液阳极氧化铝, 采用二次阳极氧化^[7,8]的方法制备了均匀有序的氧化铝通孔模板。在 n 型的 GaAs 衬底上用

分子束外延法生长 500nm GaAs 缓冲层, 把阳极氧化铝模板放置在生长 GaAs 缓冲层的 n 型 GaAs 衬底上。然后采用离子注入技术在 n 型的 GaAs 衬底上垂直注入 In 离子, 注入能量是 80keV, 剂量是 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。注入后剥离模板, 样品在 N₂ 保护下, 在不同的温度下快速退火。我们用扫描电子显微镜(SEM)观察了氧化铝模板的形貌, 用原子力显微镜观察了离子注入不同温度退火样品的表面结构。

3 结果与讨论

3.1 阳极氧化铝模板的扫描电子显微镜图片

采用二次阳极氧化制备的均匀有序的阳极氧化铝掩模板, 扫描电子显微镜照片如图 1 所示, 可以观察到模板纳米孔径约 55nm, 孔间距约 100nm, 孔密度是 10^{10} m^{-2} 。

3.2 离子注入后在 N₂ 保护下不同温度快速退火

观察 630°C 退火后的样品, 从图 2 我们发现形成了均匀有序的量子点, 量子点均匀地嵌在衬底里, 衬底的表面高度要高于量子点约 1nm。用原子力显微镜统计量子点的平均宽度是 40.9nm, 平均高度是 1.2nm, 孔密度数量级是 10^{10} cm^{-2} 。从图 3 我们发现 680°C 退火 30s 后的样品表面出现了沟道, 这

* 国家自然科学基金(批准号: 60390071, 60390074, 90301007, 60276014, 90201033, 60306010, 60476002, 60576062) 和国家重点基础研究发展规划(批准号: 2002CB311905)资助项目

† 通信作者。Email: zhouhy@mail.semi.ac.cn

2006-12-13 收到

©2007 中国电子学会

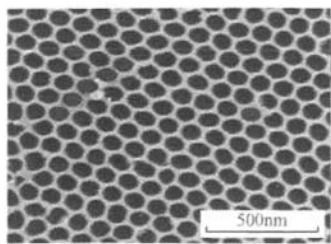


图 1 氧化铝模板的扫描电子显微镜图片
Fig. 1 SEM image of alumina template

些沟道长约 90nm, 宽约 70nm, 深度约为 8nm, 同时这些沟道是有方向性的, 沿 $[1\bar{1}0]$ 方向要长于 $[110]$ 方向。当退火温度达到 630°C, 形成有序的量子点。当退火温度达到 680°C, 衬底表面形成沿 $[1\bar{1}0]$ 方向沟道。随着退火温度的升高, 各向异性的扩散加剧。在退火过程中, 吸附原子和空穴的扩散发挥着主要作用。在各向异性的结构中, 沿不同方向的扩散势垒是不同的。因此我们认为各向异性的扩散是不同温度下退火形成不同表面现象的根本原因。

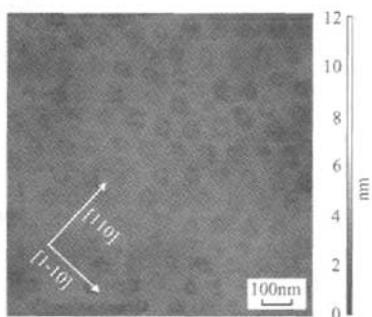


图 2 样品在 630°C 退火 30s 的原子力图片
Fig. 2 AFM image when annealed for 30s at 630°C

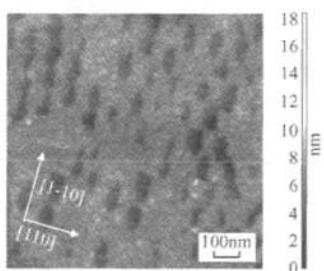


图 3 样品在 680°C 退火 30s 的原子力图片
Fig. 3 AFM image when annealed for 30s at 680°C

从图 3 可以看出, 沿 $[1\bar{1}0]$ 方向的扩散长度要比

沿 $[110]$ 方向的扩散长度长约 20nm, 这说明吸附原子沿 $[110]$ 方向的能量势垒要高于沿 $[1\bar{1}0]$ 方向的能量势垒。我们垂直注入 GaAs(100) 表面 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^2$ 的 In 离子, 当 In 离子全部替代 Ga 位时, 我们粗略地计算出 In 离子含量是 0.5%, 因此 Ga 原子的扩散起主要作用。GaAs(100) 表面 (2×4) 再构表明: As 二聚体的排列沿 $[1\bar{1}0]$ 方向, 并且每四列二聚体中就会缺少一列, 缺少的这列被称作二聚体缺失列。Tomomori^[9] 指出 In 和 Ga 原子的最佳吸附位置位于这些 As 二聚体缺失列中。研究表明 Ga 和 In 原子的最佳扩散路径也是沿着这些 $[1\bar{1}0]$ 走向的二聚体缺失列^[10]。Alexander^[12] 用第一原理方法计算出 Ga 吸附原子沿 $[1\bar{1}0]$ 方向的扩散势垒是 1.5eV, 而沿 $[110]$ 方向的扩散势垒是 1.2eV。Kenji 等人^[11] 计算得出沿二聚体缺失列的激活势垒为 0.2eV, 而沿与此垂直的 $[110]$ 方向的激活势垒达 0.6eV。从头算方法理论计算得出, Ga 和 As 原子在 GaAs(110)面上的迁移势垒远小于在 GaAs(001)面上的迁移势垒。且在 GaAs(110)面上沿相互垂直的两个方向 $[\bar{1}10]$ 和 $[001]$ 也具有不同的浅易势垒, 发现沿 $[\bar{1}10]$ 方向, Ga 迁移原子将具有更低的势垒^[13]。当 In 离子注入 GaAs 衬底形成大量的空穴、填隙子以及其他缺陷。这些缺陷由于注入和退火的过程将与其他缺陷湮灭或者形成团簇。因此各向异性扩散的加剧与注入带来的缺陷息息相关。

4 结论

我们利用均匀有序的氧化铝模板作为掩模板, 高能 In 离子选择性垂直注入 GaAs(001) 衬底, 通过退火形成了均匀的量子团簇。利用原子力显微镜观察到吸附原子的扩散随温度升高而加快, 而且呈现各向异性。

参考文献

- [1] Furdyna J K. Diluted magnetic semiconductors an interface of semiconductor physics and magnetism. *J Appl Phys*, 1982, 53: 7637
- [2] Rusponi S, Boragno C, Valbusa U. Ripple structure on Ag(110) surface induced by ion sputtering. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 2795
- [3] Sias U S, Moreira E C, Riberio E, et al. Photoluminescence from Si nanocrystals induced by high-temperature implantation in SiO₂. *J Appl Phys*, 2004, 95: 5053
- [4] Shiraliagi K, Zhang R, Tsui R. Controlled growth of quantum dots on mesa top. *J Cryst Growth*, 1999, 201/202: 1209
- [5] Konkar A, Madhukar A, Chen P. Stress-engineered spatially selective self-assembly of strained InAs quantum dots on nonplanar patterned GaAs(001) substrates. *Appl Phys Lett*, 1998, 72: 220
- [6] Zhang R, Tsui R, Shiraliagi K, et al. Selective formation and

- alignment of InAs quantum dots over mesa stripes along the [011] and [001] directions on GaAs (100) substrates. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 505
- [7] Masuda H, Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*, 1995, 268: 1466
- [8] Li A P, Muller F, Birner A, et al. Hexagonal pore arrays with a 50-420nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina. *J Appl Phys*, 1998, 84: 6023
- [9] Tomonori I, Kenji S. Theoretical investigation of migration potentials of Ga adatoms near kink and step edges on GaAs (001)-(2×4) surface. *Jpn J Appl Phys*, 1996, 35: L949
- [10] Kanisawa K, Yamaguchi H, Horikoshi Y. Electronic properties of monolayer steps on (2×4)/c(2×8) reconstructed GaAs(001) surfaces. *Phys Rev B*, 1996, 54: 4428
- [11] Shiraishi K. Ga adatom diffusion on an As-stabilized GaAs (001) surface via missing as dimer rows: first-principles calculation. *Appl Phys Lett*, 1992, 60: 1363
- [12] Alexander K, Paolo R, Matthias S. Novel diffusion mechanism on the GaAs(001) surface: the role of Adatom-Dimer interaction. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 5278
- [13] Ishii A, Aisaka T. Low and anisotropic barrier energy for adatom migration on a GaAs (110) surface studied by first-principles calculations. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 4187

Formation and Diffusion of Ordered Quantum Clusters on (001)GaAs Substrate Induced by Masked Ion Implantation*

Zhou Huiying^{1,†}, Qu Shengchun, Liu Junpeng, and Wang Zhanguo

(Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Ion implantation technology is an important way to prepare low dimension structure materials. It can form uniform and ordered nanoclusters through controlling implantation energy, implantation dose and temperature. High energy Indium ions are implanted into GaAs (001) substrate selectively through using anodic alumina templates and uniform and ordered nanoclusters are obtained. We observe that diffusion of adatoms in GaAs (001) substrate is anisotropy and diffusion increases with the increase of annealing temperature.

Key words: ion implantation technology; indium ions; anisotropy; diffusion

PACC: 7280E; 6170T; 7530G

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0208-03

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60390071, 60390074, 90301007, 60276014, 90201033, 60306010, 60476002, 60576062) and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311905)

† Corresponding author. Email: zhouhy@mail.semi.ac.cn

Received 13 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics