

## 弛豫 SiGe 外延层的 UHV/CVD 生长

罗广礼 林小峰 刘志农 陈培毅 林惠旺 钱佩信

(清华大学微电子研究所, 北京 100084)

刘安生

(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

**摘要:** 利用自制的冷壁石英腔 UHV/CVD 设备, 600℃条件下, 通过 Ge 组分渐变缓冲层技术, 在 Si(100) 衬底上成功地生长出完全弛豫、无穿透位错的  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层, 并在其上获得了具有张应变的 Si 盖帽层。另外, 还在 550℃下生长了同样结构的样品, 发现此样品厚度明显变薄, 组分渐变层的应变释放不完全, 位错网稀疏而且不均匀, 其上的  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层具有明显的穿透位错。

**关键词:** 外延层; UHV/CVD; SiGe

**PACC:** 8115; 6865

**中图分类号:** TN 304. 054    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0253-4177(2000)07-0682-04

## Growth of Fully Relaxed $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$ Layer Free of Dislocations by UHV/CVD System

LUO Guang-li, LIN Xiao-feng, LIU Zhi-nong, CHEN Pei-yi,  
LIN Hui-wang and Tsien Pei Hsin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

LIU An-sheng

(Beijing Nonferrous Institute, Beijing 100088, China)

Received 5 May 1999, revised manuscript received 21 July 1999

**Abstract:** The fully relaxed  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  epitaxial layer with Ge composition grade buffer layer is grown at 600℃ by our cold-wall ultrahigh vacuum chemical vapor deposition system (UHV/CVD). The

---

罗广礼 男, 1968 年出生, 助研, 现主要从事 GeSi 半导体材料的 UHV/CVD 生长及有关器件的研究。

林小峰 男, 1973 年出生, 博士生, 导师: 钱佩信, 研究方向: GeSi 材料及 GeSi HBT 的研究。

1999-05-05 收到, 1999-07-21 定稿

transmission electron microscopy (TEM) image shows that the  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  epitaxial layer is free of dislocations, and the Si cap layer on it is in tensile strain. Additionally, it is found that the temperature can affect the results of the growth greatly. The higher temperature can increase the growth rate and accelerate the relaxation velocity of the Ge composition grade layers. This is of advantage to the growth of thick Ge composition grade layers.

**Key words:** epitaxial layer; UHV/CVD; SiGe

**PACC:** 8115; 6865

**Article ID:** 0253-4177(2000)07-0682-04

## 1 引言

由于能与成熟的 Si 工艺技术相兼容, SiGe/Si 异质结构在微电子以及光电子应用方面得到了极大的重视<sup>[1,2]</sup>. 开发具有高迁移率的应变 Si、SiGe 和 Ge 外延层就是其中的一方面, 这些外延层的生长需要高质量的、弛豫的 SiGe 外延层作为二次衬底. 但是, 由于 Ge 和 Si 具有 4.2% 的晶格失配, 在 Si 衬底上共度生长 SiGe 时具有一临界厚度, 一旦 SiGe 外延层超过临界厚度, 应变就会在 SiGe/Si 界面处引入大量的失配位错而弛豫, 结果外延层内会形成大量的穿透位错, 而使晶体质量退化, 严重影响器件的性能.

早期的大多数方法都是基于在应变弛豫 SiGe 外延层和 Si 衬底之间形成一缓冲层, 此缓冲层充当应变释放区, 通过引入失配位错来包容失配应变. 但表面缺陷密度仍然很高. 目前, 人们又提出了诸多方法, 如组分渐变 SiGe 层<sup>[3,4]</sup>、低温外延 Si 层<sup>[5,6]</sup>以及室温 SiGe 层<sup>[7]</sup>等. 利用这些方法, 可以在缓冲层上获得高质量的应变弛豫的 SiGe 或 Ge 外延层.

本文利用自己研制的冷壁石英腔 UHV/CVD 系统<sup>[8]</sup>, 在不同温度下生长了两块具有 Ge 组分渐变 SiGe 缓冲层、SiGe 外延层以及 Si 盖帽层的样品. 并利用透射电镜和 X 射线双晶衍射技术对样品进行了分析和研究.

## 2 试验

本试验所生长的两块样品都是以 P 型(100) Si 片作为衬底片, 电阻率为  $1\text{--}100\Omega \cdot \text{cm}$ . 衬底片经过 RCA 工艺清洗和在 10% HF 酸溶液漂洗 30s 后, 立即进入生长系统, 待系统真空稳定后开始进行样品生长. 两样品的生长步骤如下: 先在 700°C 下生长 5min 的 Si 缓冲层以改善生长初始表面, 然后生长 120min 的 Ge 组份渐变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  缓冲层和 70min 的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  外延层, 最后在 600°C 下生长 20min 的 Si 盖帽层. 在生长组分渐变层和外延层时, 样品 A 和样品 B 的生长温度分别为 600°C 和 550°C. 在各生长段,  $\text{SiH}_4$  的流量恒定为 9sccm; 在生长组分渐变缓冲层时,  $\text{SiH}_4$  流量由 0 到 2.5sccm 递增; 生长  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  外延层时,  $\text{GeH}_4$  流量为 2.5sccm. 此条件下对应两生长温度的 Ge 组分分别为 0.165 和 0.17, 这一微小差别是表面反应控制的结果. 本文中, 我们可以将两样品的 Ge 组分都近似为 0.17. 两样品的结构如图 1 所示.

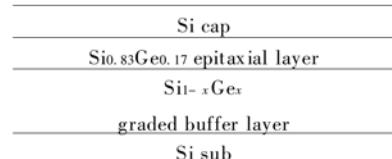


图 1 样品 A、B 的结构示意图

FIG. 1 Structure Diagram of Sample A and B

## 3 结果与讨论

图 2 是由 JEOL-2000FX 所拍摄的样品 A 的横截面透射电镜像(XTEM), 其中 Ge 组分渐变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

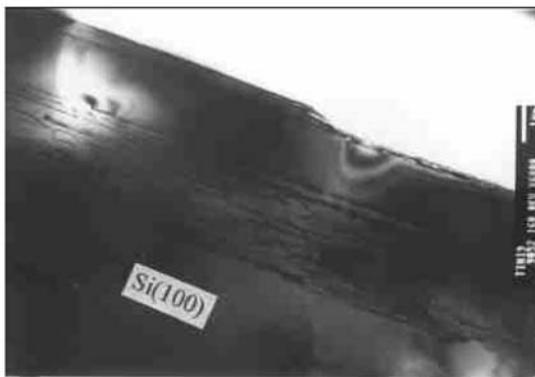


图 2 样品 A 的 XTEM 图像

FIG. 2 XTEM Image of Sample A

可见样品 A 的  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层几乎完全弛豫。 $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层右侧的平坦部分来自于组分渐变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  缓冲层，从这一特征可以看出 Ge 组分从衬底到外延层接近线性渐变<sup>[9]</sup>。另外，在 69.50 度处我们还可以观察到一凸包，它来自于 Si 盖帽层。由于它生长在完全弛豫的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层上，处于张应变状态，垂直方向上的晶格常数比原来缩短，从而峰位右移而处在 Si 衬底衍射峰的右侧。

图 4 是样品 B 的 XTEM 像。由于它的组分渐变缓冲层和外延层是在 550°C 下生长的，因此厚度比样品 A 薄。可以看出，对于 UHV/CVD 系统，生长速率对温度有很大的依赖性。尽管在 Ge 组分渐变缓冲层内有大量的位错线产生，但



图 4 样品 B 的 XTEM 图像

FIG. 4 XTEM Image of Sample B

的类 Si-Si 峰的位置分别为  $509\text{cm}^{-1}$  和  $511\text{cm}^{-1}$ ，可以估算<sup>[10]</sup> 对于样品 A、B 外延层的弛豫度分别为 87% 和 51%，可见两者的弛豫程度相差较大。这里，我们认为用此方法估算得到的弛豫度结果偏低。

缓冲层、 $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层以及 Si 盖帽层约分别为：2.5、1.7 和  $0.4\mu\text{m}$ 。可以清楚地看到，在组分渐变  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  缓冲层内产生有大量密集的位错线，这些位错线均匀分布构成位错网。而在其上面的  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层内，未观察到任何缺陷。由于位错密度很低，这里我们很难给出准确的位错密度值。另外，在  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层和 Si 盖帽层界面处也观察到了位错的分布，这显然是由于 Si 盖帽层超过了临界厚度而引起的。

图 3 是样品 A 的 X 射线双晶回摆曲线。曲线中的 SiGe 峰位于 68.59 度处。通过此衍射峰可以判断  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层的弛豫度。 $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层完全弛豫后的衍射峰应位于 68.64 度处，测量值与此值接近，

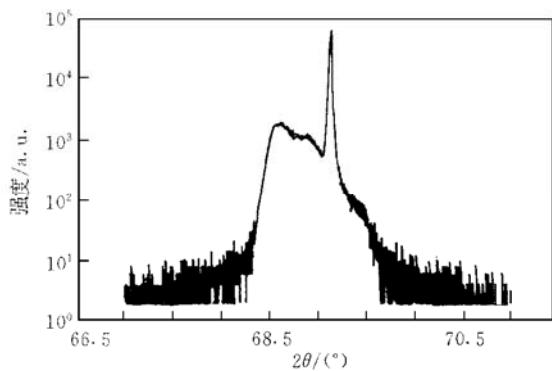


图 3 样品 A 的双晶 X 射线回摆曲线

FIG. 3 XRD Rocking Curve of Sample A

位错密度不够密集，位错网分布也不均匀。我们认为这是由于较低温度下以及 Ge 组分梯度较大所引起的弛豫速率慢和位错线钉扎机会大造成的。在  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  外延层内还观察到了穿透位错，表明晶体质量明显下降。另外，在样品 B 的 Si 盖帽层和  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层界面处未观测到位错的产生，这一点能充分说明样品 B 的  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层还未完全弛豫，使得 Si 盖帽层与  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层的晶格失配应变不够大。图 5 是样品 A 和 B 的 Raman 散射谱，为了消除盖帽层对散射谱的影响，两样品的盖帽层都被腐蚀掉。对应于样品 A、B

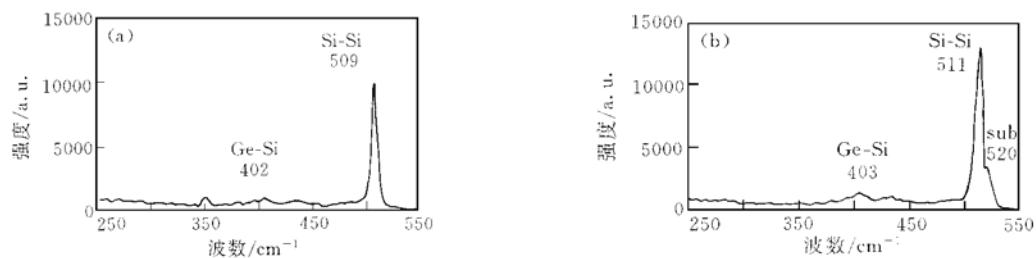


图 5 (a)、(b) 分别为样品 A、B 的 Raman 散射谱  
两样品的盖帽层已被腐蚀掉

FIG. 5 Raman Spectra of Sample A (a) and B (b)

#### 4 结论

本文利用自制的冷壁石英腔 UHV/CVD 设备, 600°C 条件下, 通过 Ge 组分渐变缓冲层技术, 在 Si (100) 衬底上成功地生长出完全弛豫、无穿透位错的  $\text{Si}_{0.83}\text{Ge}_{0.17}$  外延层, 并在其上获得了具有张应变的 Si 盖帽层。另外, 我们还发现生长温度对样品的结果有较大影响, 较高的生长温度能够提高生长速率, 加速 Ge 组分渐变缓冲层的弛豫过程, 这对于生长带有较厚渐变缓冲层的样品来说是有利的。

**致谢** 本文中的 X 射线双晶回摆曲线是由中国科学院半导体研究所的王玉田研究员测量的, 作者在此表示感谢; 本文工作得到 Motorola 公司的资助。

#### 参 考 文 献

- [1] 张进书, 金晓军, 贾宏勇, 陈培毅, 钱佩信, 罗台秦, 半导体学报, 1999, **20**(4): 284—286 [ZHANG Jinshu, JIN Xiaojun, JIA Hongyong, Chen Peiyi, Tsien Peihsin and Lo Tai-chin, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(4): 284—286 (in Chinese)].
- [2] 赵立新, 沈光地, 半导体学报, 1999, **20**(6): 468—475 [ZHAO Lixin and SHEN Guangdi, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(6): 468—475 (in Chinese)].
- [3] E. A. Fitzgerald, Y. H. Xie, M. L. Green, D. Brasen *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1991, **59**: 811.
- [4] F. K. LeGoues, B. S. Meyerson, J. F. Morar and P. D. Kircher, J. Appl. Phys., 1992, **71**: 4230.
- [5] H. Chen, L. W. Guo, Q. Cui *et al.*, J. Appl. Phys., 1996, **72**: 1167.
- [6] K. K. Linder, F. C. Zhang, J. S. Rieh *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1997, **70**: 3224.
- [7] H. Iwao, K. Yoshikawa, A. Kojima *et al.*, Appl. Surf. Sci., 1996, **100**—**101**: 487.
- [8] G. L. Luo, X. F. Lin, P. Y. Chen *et al.*, J. Mater. Sci. and Technol., (to be published).
- [9] Y. H. Xie, E. A. Fitzgerald, P. J. Silverman *et al.*, Mater. Sci. and Eng., 1992, **B14**: 332.
- [10] C. H. Perry and Feng Lu, Solid State Communications, 1993, **88**: 613.