

UHV/CVD 低温生长硅外延层的性能研究*

叶志镇 曹青 张侃 陈伟华 汪雷 李先杭 赵炳辉 李剑光 卢焕明

(浙江大学硅材料国家重点实验室 杭州 310027)

摘要 本文利用自行研制的一台超高真空化学气相沉积(UHV/CVD)系统,在 780 °C 下进行了硅低温外延,取得了表面平整、缺陷密度低、界面质量良好、界面杂质分布陡峭的薄外延层

PACC: 6150J, 7360F, 8115H

1 引言

近年来,为了适应超大规模集成电路(ULSI)和一些高频特殊器件的需要,发展了低温外延技术.利用低温外延技术可以生长出晶体结构完整、界面过渡区杂质分布陡峭、图形不发生漂移和畸变的外延层.分子束外延(MBE)和超高真空化学气相沉积是两种主要的低温外延方法.由于UHV/CVD成本相对较低、使用方便,易于工业化生产,是目前国际上低温外延所采用的主要手段之一;在锗硅超晶格生长及硅基薄膜新材料的制备上具有良好的应用前景.本实验室的UHV/CVD系统^[1]采用了超高真空技术,本底真空可达 10^{-7} Pa.这一方面可以获得一个超净的生长环境,大大减少了杂质沾污;配合严格的清洗,可以获得原子级干净的衬底表面;另外,超高真空的环境还改善了生长室的气流,有利于降低外延温度.利用UHV/CVD系统,我们进行了3硅片低温外延实验,取得了良好的结果.

2 实验

外延衬底为 $\Phi 76.2$ mm的N型CZ-Si和P型CZ-Si抛光片, $\rho = 4 \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$,生长时间为90 min,气源为100% SiH₄(无H₂载气),流量为40 sccm,外延温度为780 °C.

生长前,衬底用改进的RCA方法清洗^[2],样品放于钼托上,送入进样室.待进样室真空

* 国家教委“跨世纪优秀人才”基金、国家自然科学基金项目,部分得到南京大学固体微结构国家重点实验室开放课题资助

叶志镇 男,1955年出生,教授,博士生导师,从事UHV/CVD低温外延、锗硅超晶格及硅基薄膜研究
曹青 女,1969年出生,助理研究员,现在中科院半导体所光电子工程中心工作
1997-06-02收到,1998-02-20定稿

达到 10^{-5} Pa 时,用磁力手棒将硅片送入生长室 在外延生长前,引入适当的锗烷对衬底进行原位清洗,进一步去除硅片表面的氧^[3] 外延生长时,生长室工作压强为 10^{-1} Pa

生长后的外延片用 JEOL JSM -35CF 扫描电镜观察了表面形貌;用 JEM -4000EX 高分辨电镜观察了外延层的晶体结构;利用 SSM -150 型扩展电阻仪测试了外延层扩展电阻纵向分布

3 结果与讨论

图 1(见图版 D)为 N 100 和 N 111 外延层表面形貌的 SEM 照片.从图 1 中可以清楚地看到,外延层表面很平整,未见任何突起、麻坑等宏观缺陷 上述电镜照片说明 UHV/CVD 外延生长技术,在不同晶向衬底上生长的外延层具有良好的表面 这主要是由下述原因决定的:一是低压的环境改变了生长室中气体流动特性,使气体分子流占主导地位,没有复杂的气流特性,没有逆流发生;二是低压下气体扩散系数增大,气氛中的杂质可迅速被主流带走,减少了对外延层质量的影响;三是在外延生长过程中,没有氢气作载气,气相中氢分压低,衬底表面氢的脱附很快,硅原子在表面迁移受到阻碍减少,很容易接合到晶格中,表面生长为二维生长过程;另外,压力的降低使硅烷的气相反应受到抑制,也有利于获得表面平整光亮的外延层

图 2(见图版 D)为 P 100 外延层的横断面高分辨照片,从图中可看出外延层结构良好,衬底与外延层整齐,无明显过渡层 外延层主要的缺陷是孪晶、层错和位错 前两种缺陷的出现是由于衬底表面存在杂质原子,它们占据了衬底表面的晶格位置,使硅原子在平台-台阶-扭折生长时,受到阻碍,从而在界面处出现了少量孪晶和堆垛层错;在靠近外侧的外延层中,孪晶及层错减少,晶体质量变好,原子按一定取向整齐排列;由于生长中热应力所致,在外延层中也出现了少量位错 如前文所述,由于超高真空的环境和严格的清洗保证了干净的衬底表面,这使得外延层中的缺陷降到了很低的水平

图 3(见图版 D)为 P 100 的电阻率纵向分布图 硅的本征电阻率为 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,测得的外延层电阻率大于 $1.58 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ (超过仪器上限),接近于本征电阻率 从衬底到外延层,电阻率从 10^0 到 10^5 上升了 5 个数量级,过渡区宽度仅为 $0.12 \mu\text{m}$,过渡区非常陡峭

外延生长时,除了故意引入的杂质外,影响外延层质量的杂质可能来自于:(1)衬底的固相自掺杂;(2)从衬底的蒸发;(3)反应器系统 我们分别称之为固相外扩散、气相外扩散和系统外扩散,如图 4

图 3 曲线对照图 4 可知,图 3 样品的固相外扩散发生在距衬底 $0 \sim 0.15 \mu\text{m}$ 范围内;气相外扩散发生在固相外扩散外 $0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 范围内,而系统外扩散几乎没有 这说明系统引起的杂质沾污很少;另外,在气相外扩散区域,曲线也非

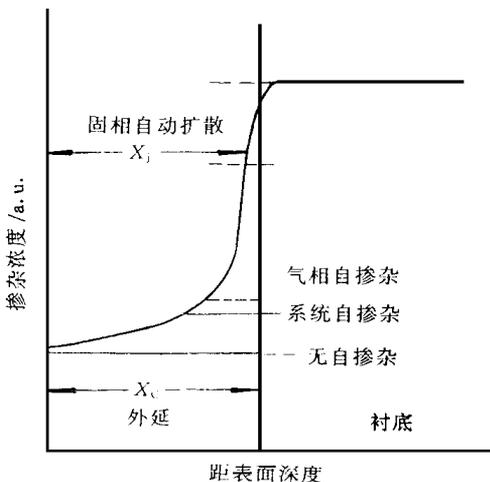


图 4 掺杂浓度杂质分布

常陡峭 但由扩展电阻测试曲线看出,固相外扩散部分相对其它部分变化较缓,所以其影响相对较大

根据 Price 和 Goldman 的理论^[4], X_j/X_c 可用下式表示为:

$$\frac{X_j}{X_c} = 1 - \frac{2K(D_f)^{1/2}}{V} \times \frac{1}{t^{1/2}}$$

若令 L 为固相外扩散影响深度,则有:

$$L = X_c - X_j, \quad \frac{L}{X_c} = 1 - \frac{2K(D_f)^{1/2}}{V} \times \frac{1}{t^{1/2}}$$

式中 K 是修正系数; D_f 是扩散系数; V 和 t 分别是生长速率和生长时间

由表达式还可知,生长速率越慢,生长时间越短, L/X_c 越大,外扩散程度越大 除了生长速率、生长时间外, L/X_c 主要与扩散系数 D_f 有关 D_f 随温度的增加而增加,因此温度越高, L/X_c 越大,外扩散程度越大 在我们的试验中,固相外扩散在各种类型的扩散中所占比重最大,主要的原因在于外延温度还是较高 我们的外延温度为 780 ,虽较常规硅外延大大降低,固相外扩散也较常规硅外延大大降低,但衬底杂质还是可能扩散进入外延层 如果进一步降低外延温度,可望进一步降低固相外扩散的影响,这也正是低温外延的意义所在

为了进一步研究固相外扩散,我们在相同的实验条件下,在 N 型衬底上进行了外延 外延片扩展电阻测试表明,电阻率分布的图形和过渡区线度都与 P 型衬底基本相同,都非常陡峭 这说明,在固相外扩散区中,固相外扩散的量非常小 不存在衬底杂质与系统杂质之间的补偿问题(即使存在,补偿杂质的量也是非常非常微小的). 因为如果大量补偿存在,则 P 型、N 型外延片中必然有一种外延片的电阻率在外扩散区变化非常缓慢

4 结论

综上所述,我们利用 UHV/CVD 系统成功地进行了硅低温外延;外延层特性良好,在过渡区的陡峭程度方面大大优于常规硅外延;在 ULSI 和一些特殊器件的制造中可望得到应用 另外,在 UHV/CVD 系统低温外延实验中,本系统得以进一步完善,为外延其它材料,比如锗硅异质结材料,打下了一定的基础

致谢 本课题在高分辨电镜分析中得到南京大学固体微结构国家重点实验室李齐教授等的大力帮助,在此表示感谢

参 考 文 献

- [1] 叶志镇等,第九届全国半导体集成电路硅材料学术年会论文集,西安:1995年,P.351
- [2] 叶志镇,姜小波等,半导体学报,1996,17(5):380~385
- [3] J. F. Morar, B. S. Meyerson *et al.*, Appl Phys Lett, 1987, 50(8): 463~465
- [4] J. B. Price, J. Goldman, J. Electrochem. Soc., 1979, 126: 2033

Characterization of Silicon Epitaxial Layers Growth at Low Temperature by UHV/CVD

Ye Zhizhen, Cao Qing, Zhang Kan, Chen Weihua, Wang Lei,
Li Xianhang, Zhao Binghui, Li Jianguang, Lu Huaming

(State Key Lab of Silicon Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Received 2 June 1997, revised manuscript received 20 February 1998

Abstract Silicon epitaxial layers were grown at 780 °C in an ultrahigh vacuum/chemical vapor deposition reactor successfully. SEM, TEM and SPR (spreading resistance measurements) were used to characterize the layers. Results show that the layers having smooth-surfaced, low fault-density and steep transition region were obtained.

PACC: 6150J, 7360F, 8115H