

75mm 4°偏轴 4H-SiC 水平热壁式 CVD 外延生长

李哲洋[†] 董 逊 张 岚 陈 刚 柏 松 陈 辰

(南京电子器件研究所, 单片集成电路与模块国家级重点实验室, 南京 210016)

摘要: 利用水平热壁式 CVD 外延生长技术, 在 75mm 偏向 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向 4°的(0001)Si-面 n 型导电衬底上同质外延生长了 4H-SiC 薄膜. 光学显微镜和原子力显微镜测试结果表明外延层表面存在三角形、胡萝卜状等典型的 4°偏轴外延缺陷及普遍的台阶形貌. 通过优化外延参数, 片内浓度均匀性(σ/mean)和厚度均匀性分别达到 4.37% 和 1.81%.

关键词: 水平热壁式 CVD; 4H-SiC; 同质外延; 均匀性

EEACC: 2520M; 2560P; 2560R

中图分类号: TN301

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2008)07-1347-03

1 引言

SiC 同质外延生长是制造 SiC 器件的关键技术, 随着单晶缺陷密度的降低, 圆片尺寸的增大, SiC 基器件在半导体器件中扮演着越来越重要的角色. 目前, 50mm 8°偏轴 4H-SiC 仍然是大多数研究团体的首选, 主要是因为 4H-SiC 具有更高的载流子迁移率和较小的各向异性, 更适合用做 SiC 微波功率器件制造, 同时在 8°偏轴衬底上外延的产品具有很好的表面形貌. 半导体制造一向朝着高性价比发展, 在更大尺寸的基片上外延生长是提高外延效率的一种方法, 同时由于 8°偏轴衬底成本较高, 一些研究团体在更小偏轴的晶片如 4°偏轴衬底上进行了外延工艺尝试^[1,2]. 小的偏轴带来一些好处, 单晶切割时提高了晶锭利用率且可减少位错缺陷^[3], 然而也给外延工艺带来了新的挑战, 在 4°偏轴衬底上生长的外延表面存在大量台阶形貌, 即所谓的“step bunching”^[4]. 尽管如此, 目前国外在一些相对稳定可靠的只需薄层外延的 SiC 器件制作中已开始使用 4°偏轴 SiC 衬底, 但对于厚层外延, 特别是有高压(>3kV)需求的器件制造为了得到好的表面形貌仍选择相对昂贵的 8°偏轴的 SiC 衬底^[5].

本文使用水平热壁式化学气相淀积(hot-wall CVD)系统, 首次在 75mm 偏向 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向 4°的 4H-SiC(0001)Si-面 n 型导电衬底上展开同质外延生长研究.

2 实验

实验在 EPIGRESS 公司生产的带有 SiH₄-C₃H₈-H₂ 系统的热壁式 CVD VP508 GFR 外延炉中进行, 具有 3×50mm, 1×75mm 和 1×100mm 外延生长能力. 典型外延温度在 1550~1600°C 之间, 生长压力为 50~150mbar, H₂ 作为稀释气体及载气, 氮气作为 n 型掺杂源, SiH₄ 和 C₃H₈ 作为生长源, 基座采用气浮旋转以提

高外延浓度和厚度均匀性, 生长速率在 6μm/h 左右, 使用商用 75mm 偏向 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向 4°的 4H-SiC(0001)Si-面 n 型导电衬底. 在我们原有的 50mm 外延工艺上优化外延工艺参数, 以同样的工艺条件生长了两个样品, 样品使用的衬底参数和外延工艺条件如表 1 所示. 用光学显微镜和原子力显微镜对外延层表面形貌进行表征, 厚度和浓度测试分别利用傅里叶变换红外光谱法(FTIR)和汞探针 CV 法(Hg-probe CV).

3 结果与讨论

3.1 表面形貌

使用光学显微镜对外延片进行观察, 有少量胡萝卜状缺陷、三角形缺陷及凹坑随机分布在外延片表面, 整个外延层表面呈台阶状形貌, 如图 1 所示. 图 2(a)和(b)分别是样品 S1, S2 的原子力图像, 表面呈台阶状, 粗糙度分别为 2.7nm 和 2.8nm; 图 2(c)是生长在 8°偏轴衬底上外延片的 AFM 图像, 表面粗糙度为 0.3nm, 明显低于 4°偏轴衬底的外延结果. 凹坑缺陷为表面颗粒清洗掉后留下的痕迹, 三角形缺陷的一角上有一明显缺陷, 如图中箭头所示, 这应该是三角形缺陷形成的源头, 这个源头可能是微管或者颗粒. 胡萝卜状缺陷和台阶状形貌产生的原因是由于衬底偏角较小, 形成较大的生长台阶, 外延时促进了缺陷的扩张^[1].

表 1 衬底参数和外延工艺条件

Table 1 Substrate specifications and epitaxy growth conditions

样品编号	直径 /mm	晶向 /($^{\circ}$)	电阻 /($\Omega \cdot \text{cm}$)	微管密度 (个/cm ²)	厚度 /μm
S1	76.1	4.06	0.017	16~30	360.11
S2	76.2	4.09	0.016	16~30	369.08
外延温度 / $^{\circ}\text{C}$	外延压力 /mbar	主氢流量 /(L/min)	硅烷流量 /(mL/min)	碳硅比	生长时间 /h
1580	100	75	20	1.5	1

[†] 通信作者. Email: lzyepi@yahoo.com.cn

2007-11-13 收到, 2007-12-14 定稿

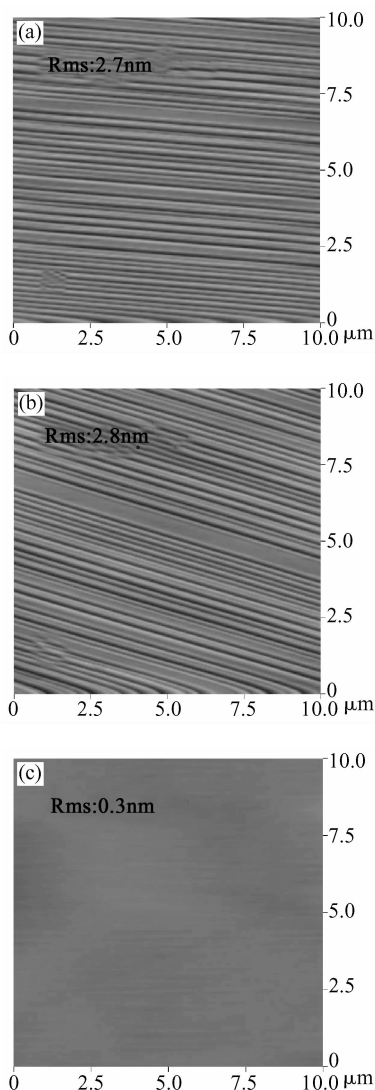
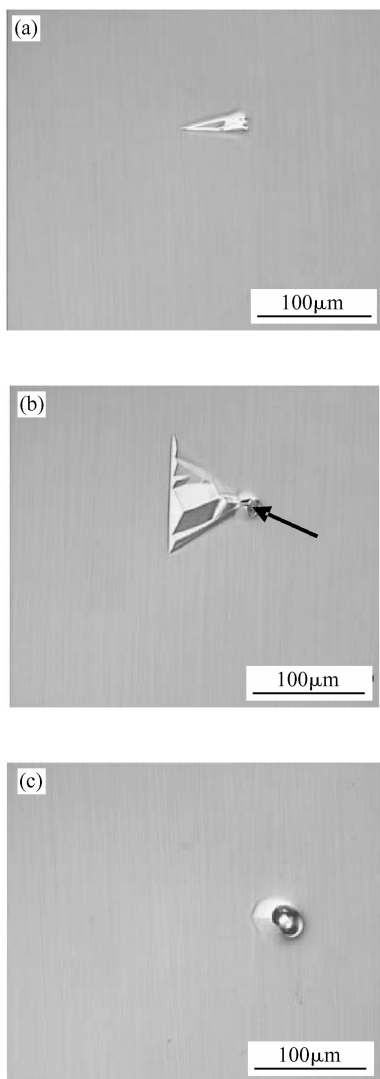


图 1 外延片表面形貌 (a)胡萝卜状缺陷;(b)三角形缺陷;(c)凹坑主要的表面形貌特征为台阶状形貌

Fig.1 Morphology of the epitaxy films Typical triangles and carrots-like defects were observed together with few down-falls, and most observable feature was the step bunching.

图 2 外延片 10 μm × 10 μm AFM 图像 (a)样品 S1 的 AFM 图像,表面粗糙度为 2.7 nm;(b)样品 S2 的 AFM 图像,表明粗糙度为 2.8 nm;(c)生长在 8° 偏轴衬底上的外延片 AFM 图像,表面粗糙度为 0.3 nm

Fig.2 10 μm × 10 μm AFM images of the epitaxy films (a) Sample S1; (b) Sample S2; (c) The epitaxy film grown on a (0001) 8° off-oriented substrate

3.2 片内浓度和厚度均匀性

由于衬底电阻率很低,外延层和衬底之间形成很明显的界线,外延层的厚度可以利用光反射技术来确定,使用 FTIR 对外延片测试了 161 个点(去除边缘 2mm,图 3 中虚线为距离边缘 2mm 分界线),测试结果如图 3 所示,总结如表 2 所示.样品 S1 和 S2 厚度均匀性(σ/mean)分别为 2.08% 和 1.81%.

表 2 厚度测试结果及总结

Table 2 Results of epitaxy thickness measurements

样品	S1	S2
最小值/ μm	6.09	6.44
最大值/ μm	6.99	7.07
平均值/ μm	6.68	6.62
均匀性(σ/mean)/%	2.08	1.81

利用汞探针 CV 对两个样品做了 21 点(去除边缘 5mm,如图 4 中虚线所示)浓度测试,测试频率 100kHz,测试电压 0 ~ -5V,步长 0.25V.测试结果如图 4 所示,总结如表 3 所示.样品 S1 和 S2 浓度均匀性(σ/mean)分别为 4.37% 和 6.11%.

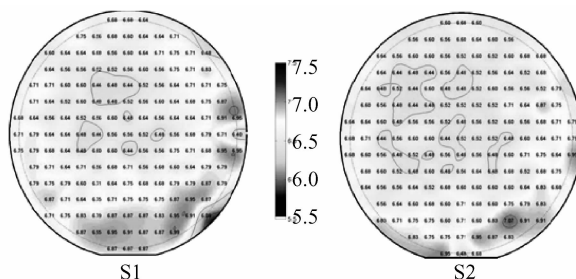


图 3 样品 S1 和 S2 的厚度均匀性分布图
Fig.3 Thickness distribution of samples S1 and S2

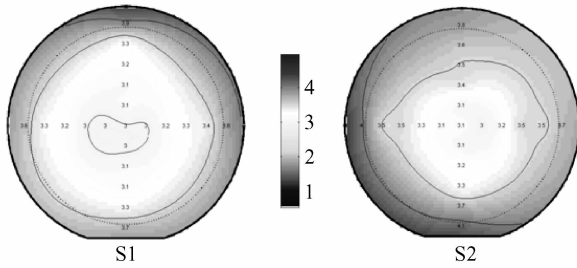


图 4 样品 S1 和 S2 的浓度均匀性分布图

Fig.4 Doping concentration distribution of samples S1 and S2

表 3 浓度测试结果及总结

Table 3 Results of doping concentration measurements

样品	S1	S2
最小值/cm ⁻³	2.95 × 10 ¹⁶	3.01 × 10 ¹⁶
最大值/cm ⁻³	3.39 × 10 ¹⁶	3.67 × 10 ¹⁶
平均值/cm ⁻³	3.15 × 10 ¹⁶	3.32 × 10 ¹⁵
均匀性(σ/mean)/%	4.37	6.11

3.3 批次间厚度和浓度一致性

经过对厚度浓度进行表征,样品 S1 和 S2 之间的浓度厚度一致性总结如表 4 所示.从表中可看出,批次间的厚度偏差为 0.9%,浓度偏差为 5.3%.

表 4 两个样品的厚度和浓度一致性

Table 4 Thickness and doping uniformity of the samples

参数	数值			
	R-R 最大值	R-R 最小值	R-R 平均值	R-R 偏差/(Max - Min) / mean
厚度/μm	6.68	6.62	6.65	0.9
浓度/cm ⁻³	3.32 × 10 ¹⁵	3.15 × 10 ¹⁶	3.235 × 10 ¹⁶	5.3

4 结论

通过优化温度、流量和 C/Si 比等工艺参数,在商用 75mm 偏向<11 $\bar{2}$ 0>方向 4° 的 4H-SiC(0001)Si-面 n 型导电衬底外延生长,获得 1.81% 和 4.37% 的片内厚度均匀性和浓度均匀性,批次间的厚度和浓度偏差分别为 0.9% 和 5.3%.良好的均匀性和一致性为进一步的器件制作提供了有力保障.实验结果表明,衬底偏角减少导致了外延片表面形貌变差,如何降低外延层的缺陷密度和台阶状形貌的影响是我们未来的研究方向.

致谢 实验过程中得到本实验室各位同事和南京国盛电子有限公司测试人员的大力支持,在此表示由衷的感谢.

参考文献

- [1] Hecht C, Thomas B, Bartsch W. Thick epitaxial layers on 4° off-oriented 4H-SiC suited for PiN-diodes with blocking voltages above 6.5kV. *Materials Science Forum*, 2006, 527~529: 239
- [2] Wada K, Kimoto T, Nishikawa K. Epitaxial growth of 4H-SiC on 4° off-axis (0001) and (000 $\bar{1}$) substrates by hot-wall CVD. *Materials Science Forum*, 2006, 527~529: 219
- [3] Thomas B, Hecht C. Epitaxial growth of n-type 4H-SiC on 3" wafers for power devices. *Materials Science Forum*, 2005, 483~485: 141
- [4] Kimoto T, Iton A, Matsunami H. Step-controlled epitaxial growth of high-quality SiC layers. *Phys Status Solidi*, 1997, 202: 247
- [5] Hull B A, Das M K, Sumakeris J J, et al. Drift-free 10-kV, 20A 4H-SiC PiN diodes. *J Cryst Growth*, 2005, 34: 341

Epitaxial Growth on 4° Off-Oriented 75mm 4H-SiC Substrates by Horizontal Hot-Wall CVD

Li Zheyang[†], Dong Xun, Zhang Lan, Chen Gang, Bai Song, and Chen Chen

(National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: 4H-SiC films were grown on 75mm Si-face n-type substrates 4° off-oriented towards the <11 $\bar{2}$ 0> direction using a horizontal hot-wall CVD system. Optical and atomic force microscopy results revealed the main defects observed were typical 4° off-large carrots, triangles, and a few down-falls. The most observable feature was the step bunching. By optimizing the process conditions, a low sigma/mean(σ/mean) value of 4.37% and 1.81% in doping concentration and thickness uniformity were obtained on the epitaxy films, respectively.

Key words: horizontal hot-wall CVD; 4H-SiC; homoepitaxy; uniformity

EEACC: 2520M; 2560P; 2560R

Article ID: 0253-4177(2008)07-1347-03

[†] Corresponding author. Email: lzyepi@yahoo.com.cn

Received 13 November 2007, revised manuscript received 14 December 2007