

4H-SiC MESFET 结构外延生长技术

李哲洋[†] 董 逊 柏 松 陈 刚 陈堂胜 陈 辰

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

摘要: 利用热壁式 CVD 技术生长 4H-SiC MESFET 结构外延材料, TMA 和氮气分别用作 p 型和 n 型掺杂源. 外延层厚度使用 SEM 进行表征, SIMS 及汞探针 C-V 用作外延层掺杂浓度测试. 通过优化生长参数, 成功生长出高质量的 MESFET 结构外延材料并获得陡峭的过渡掺杂曲线, 并给出了部分器件测试结果.

关键词: 4H-SiC; MESFET; SEM; SIMS; 汞探针 C-V
EEACC: 2520M; 2560P; 2560R

中图分类号: TN386 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0379-03

1 引言

在工作条件苛刻的情况下, Si 器件已不能完全满足高新技术武器装备的发展对高频、高功率、高电压及抗辐射等方面的要求. SiC 半导体材料具有禁带宽度大, 击穿电压高, 热导率高, 电子饱和漂移速度快, 介电常数小, 抗辐射能力强及良好的化学稳定性. SiC 优良的性能使其成为高功高频领域的理想材料, 被誉为发展前景十分广阔的第三代半导体材料.

2 实验

实验在 EPIGRESS 公司生产的带有 SiH₄-C₃H₈-H₂ 系统的热壁式低压外延炉中进行, 材料来源为美国 Cree 公司生产的偏向 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向 8° 的 4H-SiC(0001) Si 面 50mm n 型导电衬底和半绝缘衬底, H₂ 作为稀释气体及载气, 氮气和 TMA 分别作为 n 型和 p 型掺杂源, SiH₄ 和 C₃H₈ 作为生长源, 生长温度在 1550~1600℃ 之间, 生长速率为 2~4 μm/h. 生长前对衬底进行 XRD 测试, 选取半峰宽较窄且未出现伴峰的衬底, 带伴峰的衬底一般由应力及多型造成, 此类衬底外延后外延层电子迁移率低, MESFET 的性能会受到影响. 衬底放入反应室前必须进行严格的清洗(分别用 I 号液和 II 号液清洗后放入氢氟酸中漂洗 1min, 再用大量去离子水冲洗, 高纯氮气吹干待用). 生长 MESFET 结构外延材料前设备进行纯度外延生长, 并对外延片进行低温光致发光(LTPL)测试, 检验 B, Al 等杂质的背景含量, 确保反应炉内气氛良好.

结构要求: 如图 1 所示, p 型过渡层用以实现隔离防止漏电, 浓度要求在 $2 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 范围内, 外延厚度大于 0.4 μm; 沟道层浓度要求 $(1 \sim 3) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 厚度要求 350~550nm; 为了确保小的欧姆接触电阻, 外延生长接触层时浓度要尽量高, 接触层的浓度和厚度分别为 $(2 \sim 4) \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 和 200nm.

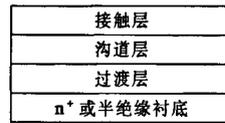


图 1 SiC MESFET 结构示意图

Fig. 1 Cross-section schematic of SiC MESFET

外延工艺流程如图 2 所示, 为了提高外延层的表面形貌, 外延前应使用氢气对衬底进行在线腐蚀,

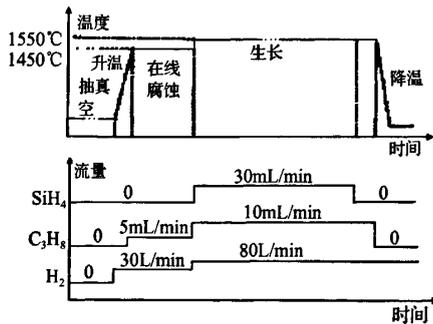


图 2 外延工艺流程图

Fig. 2 Flow diagram of epitaxy growth

[†] 通信作者. Email: lzyepi@yahoo.com.cn

2006-12-10 收到, 2007-01-06 定稿

去除表面损伤,同时为防止腐蚀过渡,可在氢气中加入少量的 C_3H_8 ^[1,2]. 生长过渡层时,采用较低的 C/Si 比,不仅可实现表面平整,还有利于微管的闭合及分解^[2,3]. 为得到符合工艺要求的接触层高掺杂浓度,确保小的欧姆接触电阻,利用竞位掺杂原理,可降低 C/Si 比,并适当提高 N_2 流量^[4].

3 表征

我们选择 SEM 作为外延层厚度测试工具,把外延片从中间破开,观察外延层的剖面. SEM 测试厚度的好处在于可以测试多层外延的厚度,使用高分辨率的 SEM,可测试低于 10nm 的外延层厚度. 利用 SEM 测试外延层厚度的关键是不同外延层的掺杂浓度要有明显的变化,大的浓度变化使得各外延层的界面有明显的界线,能清楚区分出各外延层,最容易区分的是外延一层 p 型后接着外延 n 型. 对于 MESFET 结构外延材料,沟道层和接触层之间不容易分辨,可以通过适当的熔融 KOH 腐蚀,让界面变得清晰,但 SEM 测量厚度是破坏性测试. 从我们的实验可以看出,SEM 测量的结果在利用 SIMS 测试浓度时得到了验证(图 3,图 4). 对于 MESFET 结构外延材料,各外延层的掺杂浓度可通过生长单层外延独立测试得到,然后再有机结合起来. 汞探针 C-V 测试是获得半导体材料掺杂浓度的常用方法,过渡层和沟道层的浓度是利用汞探针 C-V 测试得到,其中过渡层的掺杂浓度还可以利用次级离子质谱仪(SIMS)进行验证(图 4),对于高浓度的接触层,由于汞探针 C-V 测试 4H-SiC 材料掺杂浓度的极限为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,其浓度在室温下通过霍尔测试方法获得. 图 3 为生长在 n^+ 衬底上的 MESFET 结构材料的截面 SEM 图,显示厚度符合设计需求;图 4 是过渡层浓度的 SIMS 测试结果.

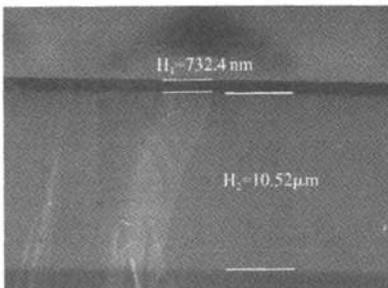


图 3 SiC MESFET 结构材料厚度 SEM 图 p 型过渡层厚 $10.52 \mu\text{m}$, n 型沟道层和接触层总厚度为 732.4 nm .
Fig. 3 SEM photo of the SiC MESFET structure The p-type buffer is $10.52 \mu\text{m}$ thick and the combined thickness of the contact layer and the channel is 732.4 nm .

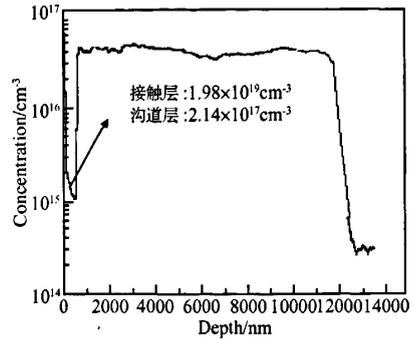


图 4 MESFET 结构材料接触层纵向分布浓度的 SIMS 测试结果 载流子浓度约为 $4.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.
Fig. 4 SIMS measurement for the doping of the p-type layer of the MESFET structure

4 器件结果与讨论

器件 $I-V$ 特性如图 5 所示,夹断电压为 -17 V ,夹断条件下漏电流小于 0.02 mA/mm ,饱和电流密度 400 mA/mm . 图 6 为 I_d, g_m 与 V_{gs} 曲线,器件的最大跨导为 26 mS/mm . 用我们生长的外延材料制作的 MESFET 器件,在 2 GHz 频率连续波状态下,制作在 n^+ 衬底生长的外延片上的 MESFET 器件最大输出功率为 1.75 W ;半绝缘衬底上的 MESFET 器件当输入功率为 0.44 W 时,输出功率超过 4 W ;而当输入功率为 0.5 W 时,得到的最大输出功率为 4.1 W ,小信号增益大于 10 dB .

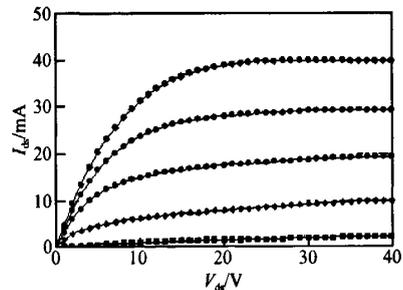


图 5 栅宽 $100 \mu\text{m}$ 4H-SiC MESFET 的 $I-V$ 特性曲线 $V_0 = 0, \Delta V = -4 \text{ V}$
Fig. 5 $I-V$ characteristics of $100 \mu\text{m}$ wide 4H-SiC MESFET with $V_0 = 0, \Delta V = -4 \text{ V}$

为提高 MESFET 器件的性能,需熟练掌握 SiC 多层 n 型和 p 型外延技术,要得到理想的 MESFET 外延材料,关键在于提高外延层的浓度厚度均匀性和完善层与层之间的过渡区域生长,过渡区域要尽量窄且掺杂浓度要“陡”. 生长接触层时尽量通过改

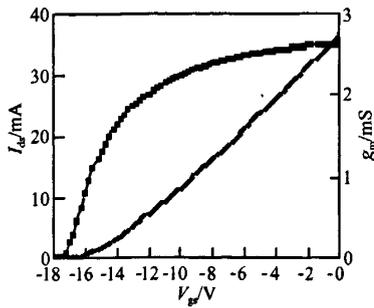


图6 I_d 、 g_m 与 V_g 的关系曲线 器件的最大跨导为 26mS/mm.

Fig. 6 Relation of I_d , g_m and V_g

变 C/Si 比来提高掺杂浓度,避免使用大流量的 N_2 , 因为大流量 N_2 的使用会产生生长记忆效应,严重影响下一炉的外延生长。

在我们的实验中, MESFET 材料外延关键技术的研究集中在浓度、厚度及层与层之间的过渡技术三个方面. 通过优化工艺参数,使用较低的 C/Si 比既有利于接触层的高浓度外延生长要求,同时还可以在过渡层生长时有效抑制衬底中的微管在外延层中延伸;我们发现 p 型外延生长时使用小流量 TMA 就能获得较高的掺杂浓度;在外延层的表征方面, SEM 在厚度表面表征方面有很好的快捷性和准确性,汞探针 C-V 是 n 型和 p 型中低掺杂浓度的有效表征工具. SiC 外延技术目前尚未完全成熟,就其机理而言仍有许多方面需要进一步探讨及完善,

尤其在减少外延层缺陷、工艺稳定性及外延参数对器件性能的影响等方面需要进一步的研究。

5 结论

利用热壁式低压外延炉,通过改进外延工艺,分别在 n^+ 衬底和半绝缘衬底上成功生长出高质量的 MESFET 结构外延材料,在这些材料上制作的 MESFET 器件具有较好的功率输出结果,充分验证了我们生长的外延片具有很好的质量, SiC 外延技术取得了突破性进展。

致谢 实验过程中得到本实验室各位同事的大力支持,在此表示由衷的感谢。

参考文献

- [1] Matsunami H, Kimoto T. Surface polarity dependence in step-controlled epitaxy; progress in SiC epitaxy. *Diamond and Related Materials*, 1997, 6: 1276
- [2] Powell J A, Larkin D J, Trunek A J. Use of gaseous etching for the characterization of structural defects in silicon carbide single crystals. *Materials Science Forum*, 1998, 264 ~ 268: 421
- [3] Tsuchida H, Kamata I, Jikimoto T, et al. 4H-SiC epitaxial growth for high-power devices. *Materials Science Forum*, 2003, 433~436: 131
- [4] Rowland L B, Burk A A Jr, Brandt C D. Nitrogen doping efficiency during vapor phase epitaxy of 4H-SiC. *Materials Science Forum*, 1998, 264 ~ 268: 115

Epitaxial Growth of 4H-SiC MESFET Structures

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

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

Abstract: Metal semiconductor field effect transistor (MESFET) structures have been grown in a hot-wall CVD reactor. Using trimethylaluminum(TMA) and nitrogen, p- and n-type epitaxial layers were grown on n^+ substrates and semi insulating substrates. Thickness of epitaxial layer has been characterized using scanning electron microscopy, and doping concentration has been determined by using secondary ion mass spectrometry and Hg probe capacitance-voltage technique. Optimization of growth parameters has resulted in very abrupt doping profiles. The grown MESFET structures have been processed and parts of the transistor properties are presented.

Key words: 4H-SiC; MESFET; SEM; SIMS; Hg probe C-V

EEACC: 2520M; 2560P; 2560R

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0379-03

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

Received 10 December 2006, revised manuscript received 6 January 2007