

# 4H-SiC MESFET 器件工艺

陈刚<sup>†</sup> 柏松 张涛 汪浩 李哲洋 蒋幼泉

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

**摘要:** 介绍了制作 4H-SiC MESFET 器件的关键工艺. 通过改进工艺, 采用半绝缘衬底的国产 SiC 三层外延片, 制造出总栅宽为 1mm, 2GHz 连续波下输出功率大于 4W, 小信号增益大于 10dB 的 SiC MESFET.

**关键词:** 4H-SiC; 金属半导体场效应管; 微波; 宽禁带半导体

**EEACC:** 2560S; 2520M

**中图分类号:** TN304.2<sup>+</sup>4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0565-03

## 1 引言

碳化硅(SiC)材料因禁带宽度大、击穿电场高(达到  $4 \times 10^6$  V/cm 以上)、热导率大(4.9W/(cm·K))、电子饱和漂移速度高( $2 \times 10^7$  cm/s)、热稳定性和化学稳定性好等优点<sup>[1]</sup>, 成为研制高频大功率、耐高温、抗辐照半导体微电子器件和电路的理想材料. SiC 器件是已经商业化应用的第三代半导体器件.

虽然国外对于 SiC 材料、器件、工艺、可靠性等进行了广泛深入的研究, 现已经进入实用化阶段; 但是对于国内, SiC 从材料到器件制造技术都还很很不成, 有大量的基础问题需要研究解决. 我们采用半绝缘衬底上自主研发生长的 SiC 三层外延材料(图 1), 吸取了国内外同行的经验教训, 改进了一系列 SiC MESFET 器件的工艺技术, 成功研制出微波输出功率大于 4W, 小信号增益大于 10dB 的 1mm 多指栅 SiC MESFET 器件, 这个结果已经达到实用化的功率输出要求.

n <sup>+</sup> cap: $\sim 2.0 \times 10^{19}$ cm <sup>-3</sup> , 0.20 μm
n channel: $\sim 2.0 \times 10^{17}$ cm <sup>-3</sup> , 0.40 μm
p <sup>-</sup> buffer: $\sim 5 \times 10^{15}$ cm <sup>-3</sup> , 0.40 μm
SI SiC substrate

图 1 自主研发的 SiC 外延材料剖面图

Fig. 1 Schematic of home-grown SiC epi wafer

## 2 实验

实验使用半绝缘衬底上的国产 4H-SiC 三层外延材料<sup>[2]</sup>, p<sup>-</sup> 缓冲层厚度为 0.4 μm, 掺杂浓度为  $5 \times$

$10^{15}$  cm<sup>-3</sup>, n 型沟道层厚度为 0.4 μm, 掺杂浓度为  $2 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>, n<sup>+</sup> 外延层厚度为 0.2 μm, 掺杂浓度为  $2 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>. p<sup>-</sup> 缓冲层厚度的设计对于 SiC 微波功率器件有一定影响<sup>[3]</sup>, 我们通过实验比较、优化后, 采用了较薄的缓冲层.

SiC MESFET 采用 100 μm 栅宽的单根栅条, 总栅宽为 1mm, 栅长为 0.8 μm, 栅源间距和栅漏间距分别为 0.8 和 1.6 μm.

制造 SiC MESFET 的工艺途径是: 台面生成、电子束蒸发 Ni、剥离生成源漏欧姆接触区、快速退火、干法刻蚀挖槽、蒸发多层金属形成肖特基接触、金属化、电镀、反刻、划片、装架<sup>[3]</sup>. 采用 Ni 作为 SiC 上的欧姆接触金属<sup>[4]</sup>, 在 1000℃ 下通过氮气保护快速退火 10min 形成良好欧姆接触. 挖槽工艺采用 ICP 干法刻蚀. 光刻使用的是 KarlSuss 的 JB3 手动光刻机, 精度能达到 0.5 μm. 由于金属化可以进一步减小电阻, 采用选择电镀的方法将金层加厚到 2 μm 甚至更厚, 从而减小压焊金丝时接触电阻对微波功率测试的影响. 多指栅 SiC MESFET 器件的各源指、漏指的互连通过空气桥来形成. 最终的 SiC MESFET 经过钝化处理. 划片后, 挑出直流性能良好的管芯进行装架, 最终封装在管壳中的 1mm SiC MESFET 器件制备完成, 可以进行各种直流、微波、高温、可靠性等测试.

## 3 结果与讨论

挖槽工艺采用感应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀方法代替了以往的反应离子刻蚀(RIE)方法, 刻蚀后发现 SiC 槽底有许多地方粗糙不平. 相对于以往的 RIE 工艺, 表面状况虽然有所改进, 但是也没

<sup>†</sup> 通信作者. Email: steelchg@163.com

2006-12-29 收到

有突破性改进,仍有许多地方有很多的尖峰. ICP 刻蚀表面状况和 RIE 刻蚀表面状况扫电如图 2,3 所示.

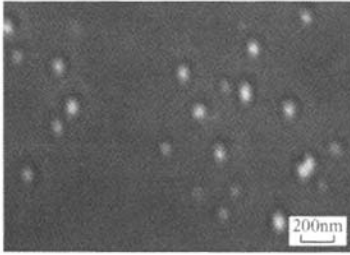


图 2 ICP 刻蚀后表面  
Fig. 2 Surface after ICP etching

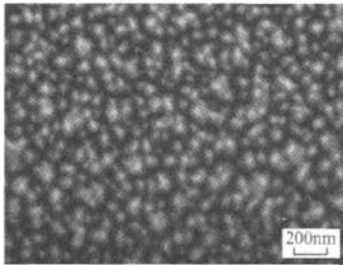


图 3 RIE 刻蚀后表面  
Fig. 3 Surface after RIE etching

这些尖峰一旦在槽里聚集并且金属栅条跨过其上,则容易引起栅条断裂,造成整个管芯报废. 可能引起栅条断开的尖峰聚集处如图 4 所示.

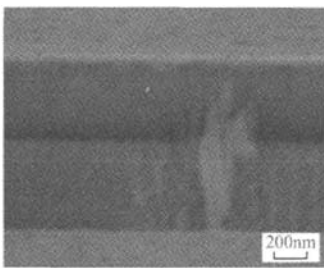


图 4 ICP 刻蚀后产生的尖峰  
Fig. 4 Sharp peaks after ICP etching

因此需要继续通过大量的实验,找到一个优化的 ICP 干法刻蚀条件,解决表面粗糙的问题. 而 ICP 最大的优点在于可以分别调控上、下电极. 调节上电极功率可以得到足够的等离子体,调节下电极则可以使偏置电压(bias voltage)足够小,以保证等离子体的物理轰击足够小,从而对 SiC 表面的损伤足够小. 而 RIE 则无法进行上、下电极的分别调控. 如果调低反应功率以降低等离子体对 SiC 表面的轰击来

减小 SiC 表面损伤,则无法保证刻蚀中有足够反应的等离子体;调高功率则等离子体对 SiC 表面的轰击增大,造成 SiC 表面损伤变大,而这种表面损伤对 Ti/SiC 肖特基接触特性有很大影响,同时也造成栅源、栅漏之间的表面在钝化后,沟道电流变小,相应微波功率也受严重影响. 因此相对于表面粗糙和表面损伤两种由于干法刻蚀产生的 SiC 表面状况,减小表面损伤的重要性要大于降低表面粗糙,但是表面粗糙也是急需解决的一个工艺难点. 可以肯定,一旦表面粗糙解决,表面损伤也能够得到很好控制, SiC MESFET 功率可以再次得到一个很大的提高.

我们采用 TLM 方法测量样品上的特征接触电阻,经过计算得到的最好的特征接触电阻率达到  $10^{-7}$  量级,对于 SiC MESFET 器件的实用要求来说,这样的欧姆接触已经能够充分胜任 SiC 器件的正常应用. 实际中欧姆接触保证在  $10^{-5}$  量级就已经可以保证器件具有足够的微波输出功率. 欧姆接触的提高对将来的更大功率的 SiC 器件和 SiC 器件的可靠性影响巨大,但由于现在其他工艺对器件性能的影响占据主要作用,因此优良的欧姆接触特性现在还无法显示其提高后的重要作用.

我们建立了专门用于 S 波段连续波下,高电压、高功率的 SiC MESFET 测试系统,可以在漏端加 120V 高电压,输入功率可以加到 5W,输出功率的测试上限为 25W,这个测试系统能够满足现阶段我们 SiC MESFET 的测试要求. 对于我们制造的 1mm 多指栅 SiC MESFET 器件,在 2GHz 频率连续波状态下,器件的典型输出功率随输入功率的变化曲线如图 5 所示. 测量条件为  $V_{ds} = 64V$ ,小信号增益大于 10dB;当输入功率为 0.44W 时,输出功率超过 4W;而当输入功率为 0.5W 时,得到的最大输出功率为 4.1W. 实现了与国际上实用化器件相当的 SiC MESFET 输出功率密度.

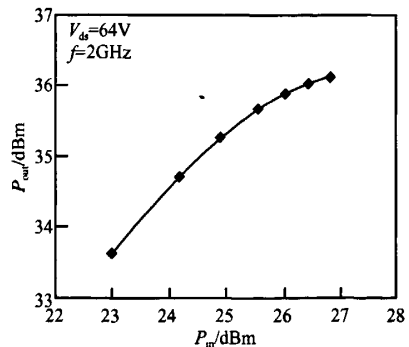


图 5 1mm 4H-SiC MESFET 在 2GHz 下的输入输出功率变化曲线  
Fig. 5 Power sweep of a 1mm 4H-SiC MESFET at 2GHz

## 4 结论

采用半绝缘衬底上自主研发的国产 SiC 三层外延片,通过改进 SiC MESFET 关键工艺加工技术,获得较好的功率输出.在 2GHz 连续波下,1mm 栅宽 SiC MESFET 输出功率大于 4W,小信号功率增益大于 10dB,取得了突破性研究成果,代表了国内微波功率 SiC MESFET 的研制取得了阶段性突破.

致谢 在实验过程中得到南京电子器件研究所一中心、五中心广大同事的帮助,在此深表谢意.

## 参考文献

- [1] Morkoc H, Strite S, Gao G B, et al. Large-bandgap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies. *J Appl Phys*, 1994, 76(3), 1363
- [2] Eriksson J, Rorsman N, Zirath H. Performance of silicon carbide microwave MESFETs using a thin p-doped buffer layer. *Materials Science Forum*, 2003, 433
- [3] Li Xiaobai. GaAs microwave power field effect transistor and integrated circuit. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese) [李效白. 砷化镓微波功率场效应晶体管及其集成电路. 北京: 科学出版社, 1998]
- [4] Weitzel C E, Palmour J W, Carter C H, et al. 4H-SiC MESFET with 2.8W/mm power density at 1.8GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 1994, 15(10), 406

## 4H-SiC MESFET Device Process

Chen Gang<sup>†</sup>, Bai Song, Zhang Tao, Wang Hao, Li Zheyang, and Jiang Youquan

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

**Abstract:** We report the key device process of 4H-SiC MESFET. We fabricate n-channel 4H-SiC MESFETs with 1mm total gate periphery with a device process designed by us. The RF characteristics are studied. At  $f_0 = 2\text{GHz}$  and  $V_{ds} = 64\text{V}$ , the maximum output power is measured to be 4.1W, and the gain of small signal exceeds 10dB.

**Key words:** 4H-SiC; MESFET; microwave; wide band semiconductor

EEACC: 2560S; 2520M

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0565-03

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: steelchg@163.com

Received 29 December 2006