

# 1mm SiC 多指栅微波功率器件

陈刚<sup>†</sup> 钱伟 陈斌 柏松

(南京电子器件研究所, 南京 210016)

**摘要:** 研制了 4H-SiC MESFET 1mm 多栅器件. 通过对 SiC 关键工艺技术进行研究, 设计出初步可行的工艺流程, 并且制作出单栅宽  $100\mu\text{m}$ , 总栅宽 1mm, 栅长  $0.8\mu\text{m}$  的 n 沟道 4H-SiC MESFET, 其微波特性测试结果为: 在 2GHz,  $V_{ds} = 30\text{V}$  时, 最大输出功率为 1.14W, 相应增益为 4.58dB, 功率附加效率为 19%, 漏极效率为 28.7%.

**关键词:** 4H 碳化硅; 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:** TN386.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)S0-0419-03

## 1 引言

碳化硅(SiC)材料因禁带宽度大、击穿电场高(达到  $4 \times 10^6 \text{V/cm}$  以上)、热导率大( $4.9 \text{W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ )、电子饱和漂移速度高( $2 \times 10^7 \text{cm/s}$ )、热稳定性和化学稳定性好等特点<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, 在通信、汽车、航空、航天、石油开采等方面有着广泛的应用前景. SiC 器件是最有希望的第三代半导体器件.

作为全新的研究领域, SiC 从材料到器件制造技术都还很很成熟, 有大量的基础问题需要研究解决. 本文主要探索 SiC MESFET 器件的制作工艺技术, 并且成功研制出具有一定微波功率特性的 1mm 多指栅 SiC MESFET 器件.

SiC RF MESFET 属于横向(水平)器件, 其源和漏接触位于晶片顶层. 典型的源、漏欧姆接触位于  $n^+$  外延层上以减少接触电阻, 轻掺杂( $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ) n 型沟道区将其分开位于栅极两侧. 沟道中多数载流子从源流向漏, 并受控于加负偏置的栅电极. 典型的器件隔离方法是在导电衬底上实现  $p^-$  缓冲层. 最近人们采用半绝缘或高阻衬底代替  $p^-$  缓冲层以降低点电容, 从而提高器件的截止频率.

## 2 实验

我们使用半绝缘衬底 4H-SiC 三层外延材料<sup>[2]</sup>, Si 面,  $p^-$  缓冲层厚度为  $0.2\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , n 型沟道层厚度为  $0.4\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ,  $n^+$  外延层厚  $0.2\mu\text{m}$ , 掺杂浓度为  $2 \times$

$10^{19} \text{cm}^{-3}$ . 选用的 SiC 材料的一个重要设计在于采用了相对高掺杂相对薄( $0.2\mu\text{m}$ )的  $p^-$  缓冲层, 这层  $p^-$  缓冲层减小了器件的输出电导. 当漏极加偏压时,  $p^-$  缓冲层/沟道层界面形成一个反向偏置的 pn 结, 缓冲层在器件漏极下耗尽, 因而在缓冲层中形成一薄层充满负电荷的耗尽区, 这层耗尽区对电子产生抵御作用, 从而使电子被限制在 n 型沟道层中<sup>[2]</sup>. SiC MESFET 采用  $100\mu\text{m}$  栅宽的单根栅条, 总栅宽 1mm, 栅长为  $0.8\mu\text{m}$ , 栅源间距和栅漏间距分别为  $0.8$  和  $1.6\mu\text{m}$ .

制作 SiC MESFET 的工艺途径是: 台面生成、平整化、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>. 我们采用 Ni 作为 SiC 上的欧姆接触金属<sup>[4,5]</sup>, 在  $1000^\circ\text{C}$  下通氮气保护快速退火 10min 形成良好欧姆接触后, 再蒸发、电镀覆盖一层厚金, 金覆盖层可以提高 Ni 与 SiC 合金退火后的薄层电导率, 同时也改善了表面形貌, 很好地提高了后面装架时的金丝与压焊点之间的接触; 更重要的是可以避免接触电阻的退化. 挖槽工艺我们采用反应离子刻蚀(RIE)干法刻蚀方法, 刻蚀后镜检可以看到挖槽完成后的 SiC 槽底粗糙不平, 这对于 Ti/SiC 肖特基接触特性来说有很大影响. 栅条光刻使用的是 KarlSuss 的 JB3 手动光刻机, 精度能达到  $0.5\mu\text{m}$ . 由于通过金属化可以进一步减小电阻, 我们采用选择电镀的方法将金层加厚到  $2\mu\text{m}$  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. 经过划片后, 挑出性能良好的管芯进行装架, 最终封装在管壳中的 1mm SiC

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

2005-12-02 收到, 2005-12-20 定稿

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

在 SiC 上蒸发 Ni 后用高倍光学显微镜观察,表面十分光滑,经过快速退火后,表面变成颗粒状结构,同时图形边界出现毛刺,这对于后面的挖槽和栅的形成有一定影响.我们通过对电子束蒸发 Ni 金属层厚度和快速退火温度与时间进行优化,发现可以找到合适的条件得到基本理想的结果,既能使 Ni 与 SiC 充分进行反应形成良好的欧姆接触,又能保持 Ni 金属表面的光滑.高温快速退火是在氮气保护下进行,温度为 1000℃,时间为 10min.我们通过 TLM 方法测量样品上的特征接触电阻,经过计算得到的特征接触电阻率如图 1 所示,可以看到已达到  $10^{-5}$  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.

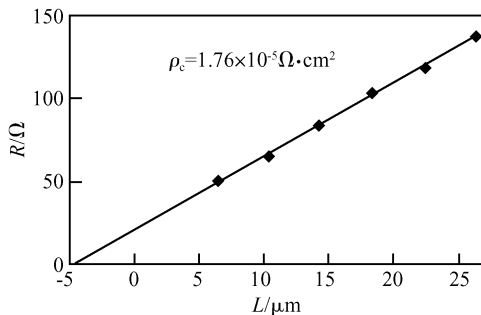


图 1 最佳的 Ni/SiC 欧姆接触的电阻-间距曲线

Fig. 1 Our best result of Ni/SiC resistance versus separation curve

对于我们制作的 1mm 多指栅 SiC MESFET 器件,在  $f_0 = 2\text{GHz}$  频率下测量的增益、输出功率如图 2 所示,测量条件为  $V_{ds} = 30\text{V}$ ,得到的最大输出功率为 1.14W,此时增益为 4.58dB,功率附加效率 PAE 为 19%,漏极效率为 28.9%.

SiC MESFET 在功率方面的进展非常快,我们制作的 SiC MESFET 器件离最优化的结果还有很大的距离,这主要表现在以下几个方面:(1)最大工作电压只有 30V,而根据理论观点, SiC 器件的击穿电压能够达到 175V,从而工作电压可以达到 80V,因此提高工作电压将显著提高器件的功率;(2)国际上已经报道 SiC 上欧姆接触电阻率可低至  $8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$  (n 型),我们虽然能够稳定得到  $10^{-5}$  量级的欧姆接触电阻率,但是如果欧姆接触电阻率能够再降低一、二个数量级,将可以增加器件的非本征跨

导,使器件性能得到更大发挥;(3)我们的 SiC 器件工艺需要改进,如果挖槽后能够得到良好无损伤的 SiC 表面, Ti/SiC 肖特基接触可以得到很大改善.

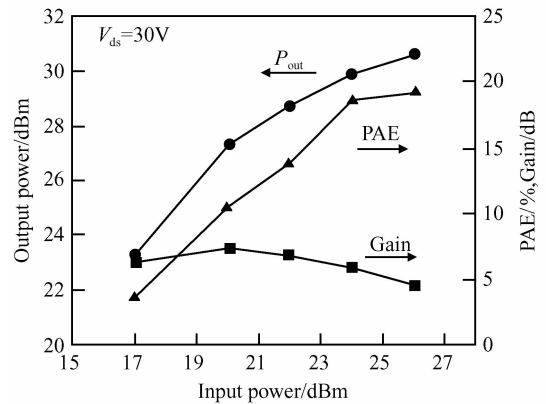


图 2 1mm 4H-SiC MESFET 在 2GHz 下的微波功率特性连续波功率达到 1.14W.

Fig. 2 Power sweep of a 1mm 4H-SiC MESFET at 2GHz showing a CW power level of 1.14W

### 4 结论

随着 SiC 器件性能的不不断提高,发展的加快,用固定的眼光来对 SiC 器件进行评述是很困难的.我们现阶段取得了 1mm 栅宽 SiC MESFET 器件微波功率达到 1.14W 且增益为 4.58dB 的结果,已经可以看出 SiC 器件的应有潜力.通过进一步的工艺研究和 SiC 器件设计优化,得到更好、更高、更快的具有实用性价值的 SiC 微波功率器件指日可待.

**致谢** 在实验过程中得到南京电子器件研究所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; 433~436; 741
- [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
- [5] Nisson P A, Saroukhan A M, Svedberg J O, et al. Characterization of SiC MESFETs on conducting substrates. *Materials Science Forum*, 2000; 338~342; 1255

## 1mm SiC Multi-Finger Gate Microwave Power Device

Chen Gang<sup>†</sup>, Qian Wei, Chen Bin, and Bai Song

(*Nanjing Electronic Devices Institute, Nanjing 210016, China*)

**Abstract:** We report our research on 1mm multi-finger gate 4H-SiC metal-semiconductor field-effect transistors (MES-FETs). We design our own device process to fabricate n-channel 4H-SiC MESFETs with  $100\mu\text{m}$  single gate, 1mm total gate periphery,  $0.8\mu\text{m}$  gate length. The RF characteristics are studied. At  $f_o = 2\text{GHz}$ ,  $V_{ds} = 30\text{V}$ , the maximum output power is measured to be 1.14W, with a gain of 4.58dB, power added efficiency 19%, and drain efficiency 28.7%.

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

**EEACC:** 2560S; 2520M

**Article ID:** 0253-4177(2006)S0-0419-03

---

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

Received 2 December 2005, revised manuscript received 20 December 2005