

跨导为 325mS/mm 的 AlGaIn/GaN HFET 器件*

张志国^{1,2} 杨瑞霞¹ 王 勇² 冯 震² 杨克武^{1,2}

(1 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)

(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

摘要: 报道了使用国产 GaN 外延材料(蓝宝石衬底)的 AlGaIn/GaN HFET 器件的制备以及室温下器件的性能. 器件栅采用场板结构, 其中栅长为 0.3 μ m, 场板长为 0.37 μ m, 源漏间距为 3 μ m. 器件的饱和电流密度为 0.572A/mm, 最大漏电流密度为 0.921A/mm, 最大跨导为 325mS/mm, 由 S 参数外推出截止频率和最高振荡频率分别为 27.9GHz 和 33.1GHz.

关键词: AlGaIn/GaN; HFET; 跨导; 直流特性; 场板

EEACC: 1350F; 2560S; 2860A

中图分类号: TN325

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)09-1789-04

1 引言

自 1993 年 Khan^[1] 报道成功研制第一只 AlGaIn/GaN 异质结场效应晶体管(HFET)以来,人们对 GaN 基器件的研究不断地取得突破. Cheng^[2] 等人报道了栅长为 0.25 μ m, 源漏间距为 2 μ m 的 GaN 基 HFET 的最大饱和电流密度为 1.71A/mm. 2004 年, Xing^[3] 等人报道了器件利用多层场板结构, 栅长为 1.5 μ m, 栅漏间距从 4 μ m 到 28 μ m 变化时, 最大击穿电压为 900V. Wu^[4] 等人报道了利用单层场板在工作电压为 120V 时, 连续波输出功率密度为 32.2W/mm, 频率为 4GHz 时最大功率附加效率(PAE)为 54.8%. Okamoto^[5] 等人报道了采用栅挖槽和场板工艺, 得到跨导为 220mS/mm, 击穿电压为 200V, 在频率为 2GHz 时, 工作电压为 47V, 32mm 总栅宽器件输出功率为 149W, PAE 为 64%, 8.7dB 的线性增益.

国内由于受材料和工艺的限制, 有关 GaN 材料和器件的研究相对较少, 时间上也相对较晚. 2000 年, 曾庆明^[6] 等人报道了采用自产材料研制出第一只 AlGaIn/GaN HEMT, 该器件的最大跨导为 157mS/mm, 截止频率和最高振荡频率分别为 12GHz 和 24GHz, 但没有报道微波功率特性. 2002

年, 张锦文等人^[7] 报道了栅长为 1.5 μ m, 最大跨导为 47mS/mm 的器件. 2003 年, 肖冬萍^[8] 等人报道了栅长为 1 μ m, 源漏间距为 4 μ m, 最大跨导为 198mS/mm 的 HEMT 器件. 张小玲^[9,10] 等人分别于 2003 年和 2004 年报道跨导为 120mS/mm 和 220mS/mm HEMT 的器件, 为目前国内报道的跨导最高的 GaN 基器件. 2004 年, 中国科学院微电子研究所邵刚等人^[11] 报道了 2GHz 下功率增益为 11.58dB, 功率密度为 1.75W/mm 的 AlGaIn/GaN HFET 器件.

本文报道了栅采用场板(field plate)结构, 栅长为 0.3 μ m, 场板长为 0.37 μ m 的 AlGaIn/GaN HFET 器件的制备. 此器件源漏饱和电流密度 $I_{ds} = 572\text{mA/mm}$; 栅压 $V_g = 2.5\text{V}$ 时, 源漏最大电流为 921mA/mm; 夹断电压 $V_{po} = -3.2\text{V}$; 当漏电压 $V_{ds} = 5.5\text{V}$, 栅电压 $V_g = -1.43\text{V}$ 时最大跨导 $G_m = 325\text{mS/mm}$, 此值是国内有关 AlGaIn/GaN HFET 器件跨导的最大值, 并且与国际上报道的器件跨导的最大值接近, 说明器件的制备工艺已经达到国际先进水平. 同时场板结构的采用提高了器件的栅漏击穿电压, 得到栅漏电流为 10 μ A 时, 器件的栅漏击穿电压大于 50V, 为器件的高输出功率创造了前提条件.

*国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号:51327030201)

2005-02-03 收到, 2005-04-12 定稿

2 器件制备

本文采用的 GaN 外延材料为国产材料,材料和器件的结构简图如图 1 所示,其中 AlGaIn 层 Al 的摩尔百分含量为 27%。器件制备采用典型的 AlGaIn/GaN HFET 的制备工艺,源漏金属采用电子束蒸发的方法制备 Ti/Al/Ni/Au 金属层, N₂ 保护下快速退火形成欧姆接触,传输线测试接触电阻为 $4.2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$,并且具有良好的形貌,可以满足下一步工艺的要求。图 2 为光学显微镜下放大 1000 倍后 TLM 图形的形貌,两条传输线之间的间距为 3 μm ,合金后表面平整,四周轮廓清晰。电子束蒸发 Ni/Au 作为肖特基结金属,栅长为 0.3 μm ,栅场板长为 0.37 μm ,如图 3 所示。利用网络分析仪对器件的直流特性和脉冲小信号特性进行测试,得出器件的各项参数。

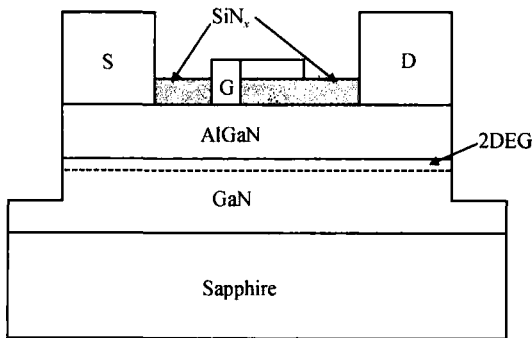


图 1 AlGaIn/GaN HFET 截面示意图

Fig. 1 Cross section of AlGaIn/GaN HFET

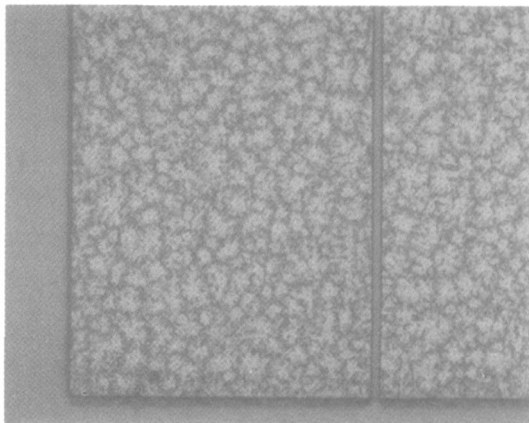


图 2 欧姆接触快速退火后的表面形貌

Fig. 2 Topograph of the ohmic contact after RTA

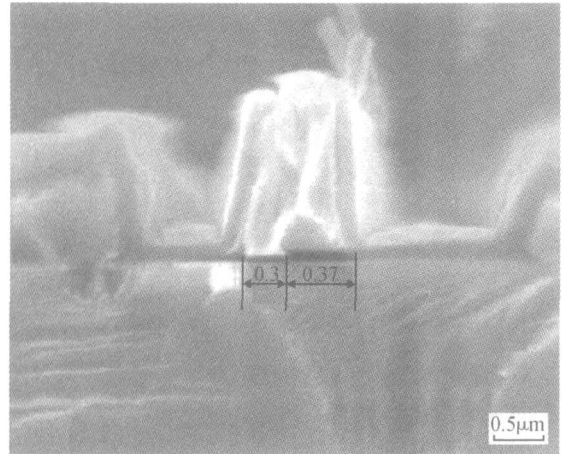


图 3 AlGaIn/GaN HFET 栅扫描电镜图

Fig. 3 Gate SEM of AlGaIn/GaN HFET

3 器件主要特性

对于短沟道的 GaN 基 HFET 器件,当源漏之间加工作电压以后,二维沟道中的电子便以饱和速度运动,此时沟道内电场强度为 E_{crit} ,饱和漏电流为:

$$I_{\text{dss}} = \frac{(x) v_{\text{sat}} W_g}{d} \left(\sqrt{(E_{\text{crit}} L_g)^2 + (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}(x))^2} - 1 \right) \quad (1)$$

饱和区单位栅宽跨导的表达式为:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{\text{dss}}}{\partial V_g} \right|_{V_{\text{DS}} = \text{const}} = \frac{(x) v_{\text{sat}} W_g}{d} \times \frac{V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}(x)}{\sqrt{(E_{\text{crit}} L_g)^2 + (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}(x))^2}} \quad (2)$$

其中 v_{sat} 为载流子的饱和速度; W_g 为栅宽; L_g 为栅长; d 为 AlGaIn 层的厚度; V_{gs} 为源漏电压; V_{th} 为阈值电压。对于短栅长器件, (2) 式根号下第一项可以忽略,则

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{\text{dss}}}{\partial V_g} \right|_{V_{\text{DS}} = \text{const}} = \frac{(x) v_{\text{sat}} W_g}{d} \quad (3)$$

器件的截止频率 $f_t = g_m / 2 C_{\text{gs}}$, 电流增益 $\text{Gain} = g_m / j(\omega C_{\text{gs}} + C_{\text{gd}})$, 可见提高跨导将会使器件的两个重要参数——截止频率和电流增益提高,这对器件是十分重要的。

使用网络分析仪对器件进行直流测试和微波小信号测试。室温下总栅宽 0.1mm 的 GaN HFET 在栅电压 V_{gs} 从 0 到 -3.2V 的 $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$ 输出特性如图 4 所示,其中零栅压时源漏电流 $I_{\text{ds}} = 0.572 \text{A/mm}$,测试显示最大饱和电流 $I_{\text{ds,max}} = 0.921 \text{A/mm}$ 。

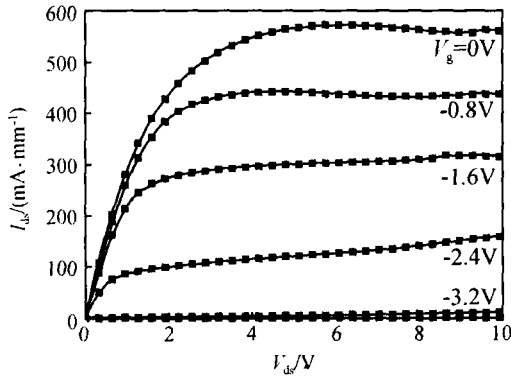


图 4 AlGaIn/ GaN HFET 直流 I-V 特性

Fig. 4 DC I-V characteristics of AlGaIn/ GaN HFET

图 5 为漏电压为 5.5V 时 AlGaIn/ GaN HFET 器件的转移特性曲线,当栅电压 $V_g = -1.43V$ 时,跨导 $g_m = 325mS/mm$,这一数值是目前国内报道的 AlGaIn/ GaN HFET 器件中跨导的最大值,并且远大于国内已有文献的报道.

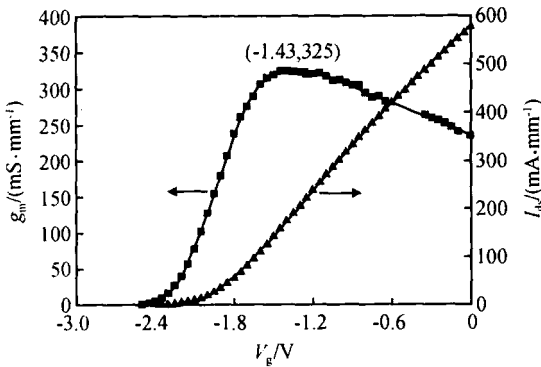


图 5 AlGaIn/ GaN HFET 的转移特性曲线

Fig. 5 Transfer characteristics of AlGaIn/ GaN HFET

利用网络分析仪对器件进行微波小信号分析,得到器件的 S 参数,由 S 参数推导出器件的 H 参数和单向功率增益如图 6 所示,其中实线和虚线分别为拟合的结果,带符号的曲线由测试的 S 参数得到.由拟合结果得出截止频率和最大频率分别为 27.9GHz 和 33.1GHz.

4 结论

本文成功地制备了栅场板结构的 AlGaIn/ GaN HFET 器件,在室温下测试得到漏电压为 5.5V,栅电压为 -1.43V 时器件的非本征饱和跨导为 325mS/mm,最大饱和漏电流为 0.921A/mm,截止

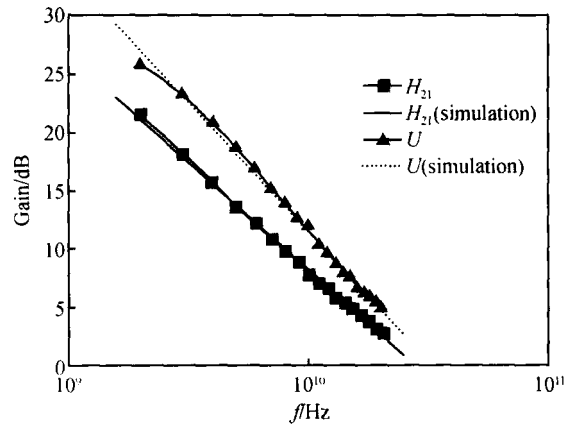


图 6 AlGaIn/ GaN HFET 增益与频率的关系

Fig. 6 Gain versus frequency for AlGaIn/ GaN HFET

频率和最大频率分别为 27.9GHz 和 33.1GHz. 由于采用栅场板结构,增加了器件的栅漏击穿电压,测试得到电流为 10μA 时,器件的栅漏击穿电压大于 50V. 高击穿电压,高的跨导均为高输出功率创造了前提条件,目前已经测试得到性能理想的微波大信号特性,将在今后的文章中报道.

参考文献

- [1] Khan M A ,Bhattarai A ,Kuznia J N ,et al. High electron mobility transistor based on a GaN-AlGaIn heterojunction. Appl Phys Lett ,1993 ,63(9) :1214
- [2] Chen Q ,Yang J W ,Khan M A ,et al. High transconductance AlGaIn/ GaN heterostructure field effect transistors on SiC substrate. Electron Lett ,1997 ,33(16) :1413
- [3] Xing Huili ,Dora Y ,Chini A ,et al. High breakdown voltage AlGaIn/ GaN HEMTs achieved by multiple field plate. IEEE Electron Device Lett ,2004 ,25(4) :161
- [4] Wu Y F ,Saxler A ,Moore M ,et al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. IEEE Electron Device Lett ,2004 ,25(3) :117
- [5] Okamoto Y ,Ando Y ,Nakayama K ,et al. A 149W recessed-gate AlGaIn/ GaN FP-FET. IEEE MTT-S Dig ,2004 :1351
- [6] Zeng Qingming ,L üChangzhi ,Liu Weiji ,et al. Study on Al-GaN/ GaN HEMT devices. Journal of Functional Material and Devices ,2000 ,6(3) :170 (in Chinese) [曾庆明 ,吕长志 ,刘伟吉 ,等. AlGaIn/ GaN HEMT 器件研究. 功能材料与器件学报 ,2000 ,6(3) :170]
- [7] Zhang Jinwen ,Yan Guizhen ,Zhang Taiping ,et al. Fabrication of Au-AlGaIn/ GaN HFET and its properties. Chinese Journal of Semiconductors ,2002 ,23(4) :424 (in Chinese) [张锦文 ,闫桂珍 ,张太平 ,等. Au-AlGaIn/ GaN HEMT 研制与器件特性. 半导体学报 ,2002 ,23(4) :424]

- [8] Xiao D P, Liu J, Wei K et al. High transconductance AlGaIn/GaN HEMT growth on sapphire substrates. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(9) : 907
- [9] Zhang Xiaoling, Lü Changzhi, Xie Xuesong, et al. Research on AlGaIn/GaN HFET. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8) : 847 (in Chinese) [张小玲, 吕长志, 谢雪松, 等. AlGaIn/GaN HEMT 器件的研制. 半导体学报, 2003, 24(8) : 847]
- [10] Zhang Xiaoling, Lü Changzhi, Xie Xuesong, et al. AlGaIn/GaN HEMT with transconductance of over 220mS/mm. Research & Progress of SSE, 2004, 24(2) : 209 (in Chinese) [张小玲, 吕长志, 谢雪松, 等. 跨导为 220mS/mm 的 AlGaIn/GaN HEMT. 固体电子学研究与进展, 2004, 24(2) : 209]
- [11] Shao Gang, Liu Xinyu, He Zhijing, et al. Development of AlGaIn/GaN power HEMTs grown on sapphire substrates. Chinese Journal of Electron Devices, 2004, 27(3) : 381 (in Chinese) [邵刚, 刘新宇, 和致经, 等. 蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN 功率 HEMT 研究. 电子器件, 2004, 27(3) : 381]

AlGaIn/GaN HFET with Transconductance of over 325mS/mm^{*}

Zhang Zhiguo^{1,2}, Yang Ruixia¹, Wang Yong², Feng Zhen², and Yang Kewu^{1,2}

(1 School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract : Fabrication and characteristics at room temperature of AlGaIn/GaN HFET grown on sapphire substrate are reported. The field plate of gate is adopted. The gate length is 0.3 μ m and the field plate is 0.37 μ m. These 3 μ m-distance between source and drain devices exhibit excellent DC characteristics: saturated current density is 0.572A/mm, the maximal current density is 0.92A/mm, and the maximal transconductance is 325mS/mm. At the same time, the cutoff frequency (f_T) of 27.9GHz and the maximum frequency of oscillation (f_{max}) of 33.1GHz are also obtained.

Key words : AlGaIn/GaN; HFET; transconductance; DC characteristic; field plate

EEACC : 1350F; 2560S; 2860A

Article ID : 0253-4177(2005)09-1789-04

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 51327030201)

Received 3 February 2005, revised manuscript received 12 April 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics