

C 波段 0.75mm AlGaIn/GaN 功率器件 *

陈晓娟 刘新宇 和致经 刘 建 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 研制并测试了以蓝宝石作衬底的 $10 \times 75 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN 微波器件,采用等离子增强气相化学沉积的方法生长了 250nm 的 Si_3N_4 形成钝化层,直流特性从 0.56A/mm 上升到 0.66A/mm,跨导从 158mS/mm 增为 170mS/mm,截止频率由 10.7GHz 增大到 13.7GHz,同时在 4GHz 下, $V_{ds} = 25\text{V}$, $V_{gs} = -2.5\text{V}$,输出功率由 0.90W 增至 1.79W,输出功率密度达到 2.4W/mm. 钝化有效地改善了器件的输出特性,减小和消除了表面寄生栅对器件的影响.

关键词: AlGaIn/GaN HEMT; 微波输出功率; Si_3N_4 ; 钝化

EEACC: 4130

中图分类号: TN814+.7 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)09-1804-04

1 引言

AlGaIn/GaN 是国际上广泛关注的新型宽禁带化合物半导体材料, GaN 具有较宽的禁带宽度 (3.4eV), 很强的击穿场强 ($3 \times 10^6 \text{V/cm}$), 较高的电子饱和漂移速率 ($2 \times 10^7 \text{cm/s}$), 以及良好的热稳定性. 鉴于 GaN 器件在高频、高功率、低噪声、纳米器件方面所显示出的强大优势, 在国防以及民用通信、卫星领域有着重要的应用前景, 在国外已经成为研究重点和热点. 目前国际上报道 GaN 单指 HEMTs 器件 10GHz 下连续波功率密度可达 10.7W/mm, PAE 约为 40%^[1], 在 20GHz 下, 0.3 μm 器件 CW 测试功率密度可达到 3W/mm, PAE 为 22.5%^[2]. SiC 衬底 GaN 单指器件 f_T 大于 160GHz, 蓝宝石衬底 f_T 大于 110GHz.

近几年来, 国内也在开展 AlGaIn/GaN HEMT 的研究^[3-6], 单指型 200 μm 器件输出功率 1.8GHz 下为 28.93dBm, 功率密度为 3.9W/mm^[6]. 本文报道了基于国产蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN 的多指型器件的功率特性, 4GHz 下, $V_{ds} = 25\text{V}$, $V_{gs} = -2.5\text{V}$, $10 \times 75 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ 输出功率为 32.52dBm, 输出功率密度达到 2.4W/mm, 功率增益为 13dB. 此外, 采

用等离子增强气相化学沉积 (PECVD) 的方法生长了 250nm 的 Si_3N_4 , 表面钝化大大提高了 AlGaIn/GaN 的器件特性, 并且提高了器件的可靠性. 本文就多指型 $10 \times 75 \mu\text{m} \times 0.8 \mu\text{m}$ AlGaIn/GaN HEMT 器件钝化前后的性能进行全面对比与分析, 并进一步阐述了钝化对器件的影响机理.

2 器件结构与工艺

本文采用中国科学院半导体所和物理所提供的 50mm AlGaIn/GaN 外延材料, 材料采用金属有机物化学气相淀积技术 (MOCVD) 制备, 衬底为蓝宝石. 材料结构由下至上分别为 3.5 μm 的 GaN 缓冲层, 110nm 的高迁移率 GaN 层, 23nm 的不掺杂 AlGaIn 层, Al 组分为 20%. 霍尔测量得出室温下二维电子气的浓度为 $1.3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, 迁移率为 $1120 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

AlGaIn/GaN HFET 工艺流程为: (1) 器件隔离使用 ICP 干法刻蚀实现, 测试结果显示岛间电流仅有 pA 量级; (2) 欧姆接触采用的是 Ti/Al/Ti/Au, 在 780 $^\circ\text{C}$ 下进行快速 50s 热退火 (RTA), 实现了约 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的低接触电阻; (3) 栅金属采用 Ni/Au, 使用卡尔休斯 MA6 光刻机, 栅长为

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2002CB311903) 及中国科学院创新 (批准号: KGCX2-SW-107) 资助项目

陈晓娟 女, 1979 年出生, 硕士研究生, 从事化合物半导体器件与电路研究.

刘新宇 男, 1973 年出生, 研究员, 从事化合物半导体器件与电路研究.

2005-01-11 收到, 2005-03-16 定稿

0.8 μm ; (4) 为了使走线能够承受大电流, 并降低器件的引线电阻同时增大正面散热面积, 整个器件的布线使用电镀工艺将布线金属加厚至 2.5 μm , 并使用新的电镀空气桥实现源区的连接, 减小栅源寄生电容; (5) 最后, 采用等离子增强气相化学沉积 (PECVD) 的方法生长了 250nm 的 Si_3N_4 形成钝化层. 在生长 Si_3N_4 时, 对介质层的应力严格控制, 本实验采用了低张应力的 Si_3N_4 作为钝化膜, 取得了较好的结果.

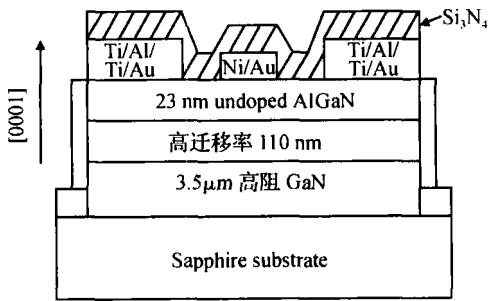


图 1 GaIn/ AlGaIn 外延结构图

Fig. 1 Schematic structure of the AlGaIn/ GaN HFET

3 结果与讨论

采用 hp4155 仪器测试了器件的直流特性, 图 2 示出, 钝化前后器件饱和漏电流从 0.56A/mm 提高到 0.66A/mm, 增加了近 20%, 膝点电压为 3.8V, 截止电压为 -4V. 器件的传输特性中最大跨导也从钝化前的 158mS/mm 增加为 170mS/mm. 器件表面进行 Si_3N_4 钝化后, 有效降低了表面陷阱及负电荷的密度, 改善了表面缺陷能级对电子的俘获, 从而降低了沟道的快速耗尽, 增加了二维电子气的浓度, 使得器件跨导提高, 饱和电流增大^[7].

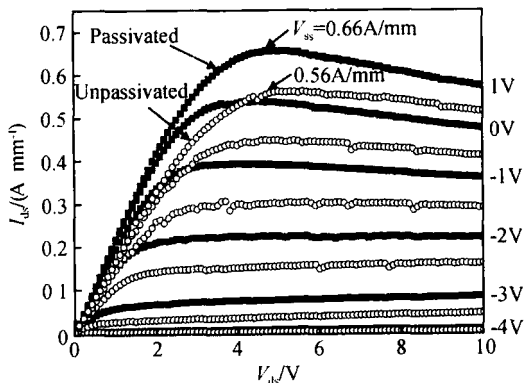


图 2 750 μm AlGaIn/ GaN HEMT I - V 特性

Fig. 2 I - V characteristics of 750 μm gate width AlGaIn/ GaN HEMT

图 3 示出了栅电流随栅压的变化图, 可以看出钝化后肖特基势垒略微下降. 这是因为钝化后, AlGaIn 层费米能级 E_f 向导带漂移 1eV^[8], 正是这种漂移使得肖特基的势垒高度降低. 图 4 示出了器件的正向电流增益 (h_{21}) 测试结果, 在 $V_{ds} = 10\text{V}$, $V_{gs} = -2\text{V}$, 器件的截止频率从钝化前的 10.7 GHz 增加到 13.7 GHz. 这主要是由于寄生栅在栅源之间形成电容, 与栅电容并联导致频率特性的下降. 钝化层的引入有效抑制了栅漏间表面缺陷对电子的俘获, 栅漏间表面寄生栅的去除, 使得器件的有效栅长缩短, 栅电容减小, 微波特性得到明显改善. 利用负载牵引 load-pull 系统测试器件功率特性如图 5 所示, 采用了 AB 类工作方式, 在 4GHz 下, 钝化前 $V_{ds} = 30\text{V}$, $V_{gs} = -2.5\text{V}$, 输出功率为 29.54dBm, 线性功率增益为 10.54dB, 钝化后, 测试条件为 $V_{ds} = 25\text{V}$, $V_{gs} = -2.5\text{V}$, 输出功率增加到 32.52dBm, 线性功率增益 12.92dB. 1dB 压缩点向大信号方向漂移, 更有利于功率输出.

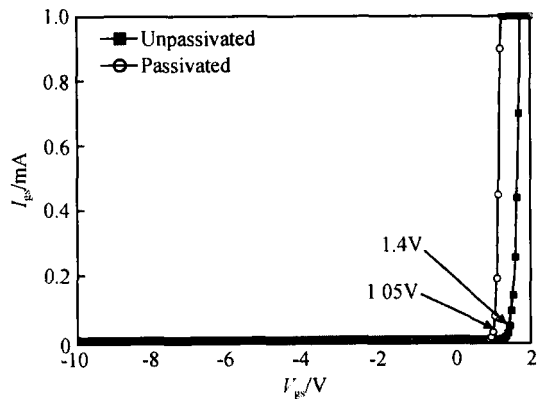


图 3 肖特基栅特性

Fig. 3 Gate diode I - V characteristics of HEMT

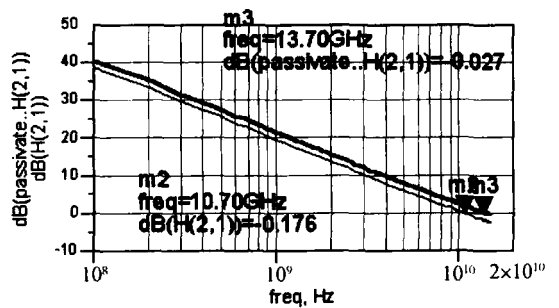


图 4 正向电流增益 (h_{21})

Fig. 4 Forward current gain (h_{21})

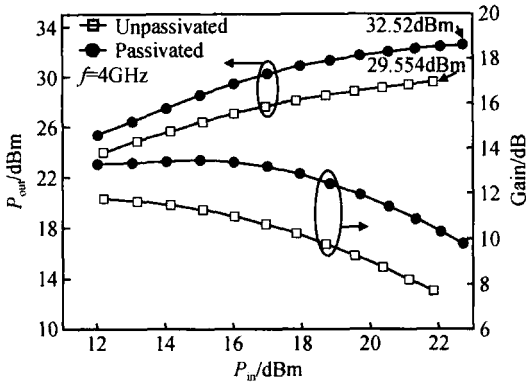


图 5 AlGaIn/GaN HEMT 功率输出特性

Fig. 5 Power characteristic of AlGaIn/GaN HEMT

从以上的对比数据可以看出,钝化技术能十分显著地改善器件的微波和功率特性. 我们知道,在 AlGaIn/GaN 器件表面存在表面陷阱能级,如图 6 所示. 表面陷阱能级俘获电子形成负电中心,产生寄生栅,工作电压越高,寄生栅的负电积累越增强,耗尽层加深,使得二维电子气浓度降低,输出电流下降. 使用 Si₃N₄ 钝化器件可以有效降低表面陷阱能级的密度,阻止表面负电中心的产生,降低寄生栅对沟道电子的耦合作用,从而减小和消除表面的俘获效应^[9].

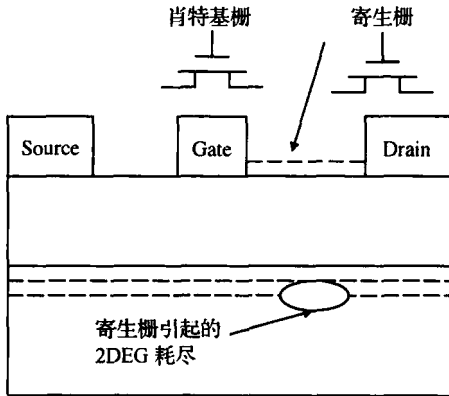


图 6 表面寄生栅示意图

Fig. 6 Negative additional gate charge on the device surface

4 总结

本文研制了基于蓝宝石衬底的 10 × 75μm × 0. 8μm AlGaIn/GaN 微波器件. 采用 PECVD 技术生长了 25nm Si₃N₄ 对器件进行了表面钝化,有效抑制了表面缺陷对电子的俘获,从而降低了沟道的快

速耗尽,提高了二维电子气的浓度,使得饱和电流输出和最大跨导得以提高. 同时,表面钝化还降低了表面态密度,降低了寄生栅的影响,从而大大提高了微波和功率特性. 直流特性从 56mA/mm 上升到 66mA/mm,跨导从 158mS/mm 增为 170mS/mm,截止频率由 10. 7GHz 增大到 13. 7GHz,同时在 4GHz 下, V_{ds} = 25V, V_{gs} = - 2. 5V,输出功率由 29. 54dBm 增至 32. 52dBm,输出功率密度由原来的 1. 2W/mm 增大一倍达到 2. 4W/mm.

参考文献

- [1] Tilak V, Green B, Kaper V, et al. Influence of barrier thickness on the high-power performance of AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE Electron Device Lett, 2001, 22: 504
- [2] Vescan A, Dietrich R, Wieszt A, et al. AlGaIn/GaN MODFET's on semi-insulating SiC with 3W/mm at 20GHz. Electron Lett, 2000, 36: 1234
- [3] Zhang Xiaoling, Lü Changzhi, Xie Xuesong, et al. Research on AlGaIn/GaN HEMT. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(8): 847 (in Chinese) [张小玲, 吕长治, 谢雪松, 等. AlGaIn/GaN HEMT 器件的研制. 半导体学报, 2003, 24(8): 847]
- [4] 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 HFET 研制与器件特性. 半导体学报, 2002, 23(4): 424]
- [5] Xiao Dongping, Liu Jian. High transconductance AlGaIn/GaN HEMT grown on sapphire substrates. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 24(9): 907
- [6] Chen Tangsheng, Jiao Gang, Xue Fangshi, et al. Undoped AlGaIn/GaN microwave power HEMT. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(1): 69 (in Chinese) [陈堂胜, 焦刚, 薛舫时, 等. 非掺杂 AlGaIn/GaN 微波功率 HEMT. 半导体学报, 2004, 25(1): 69]
- [7] Vetury R, Zhang N Q, Keller S, et al. The impact of surface state on the DC and RF characteristic of AlGaIn/GaN HEMT. IEEE MTT-S Digest, 2002: 1815
- [8] Dang X Z, Yu E T, Piner E J, et al. Influence of surface processing and passivation on carrier concentrations and transport properties in AlGaIn/GaN heterostructures. J Appl Phys, 2001, 90: 1357
- [9] Gree B M, Chu K K, Martin Chumbes E, et al. The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaIn/GaN HEMT's. IEEE Electron Device Lett, 2000, 21(6): 268

10 × 75 μm × 0.8 μm AlGa_N/Ga_N Power Devices on Sapphire Substrate with Output Power Density of 2.4 W/mm at 4 GHz^{*}

Chen Xiaojuan, Liu Xinyu, He Zhijing, Liu Jian, and Wu Dexin

(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: This paper reports an high performance AlGa_N/Ga_N power heterostructure field effect transistors (HEMTs) on sapphire substrate with total gate width of 0.75mm. After surface passivation with 25nm Si₃N₄ based on the plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) method, drain current and transconductance of AlGa_N/Ga_N HEMT increase from 560mA/mm and 158mS/mm to 660mA/mm and 170mS/mm. More increase of output power from 29.54dBm to 32.52dBm. The surface passivation effectively eliminates or reduces the defects limiting both the RF and power characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMT.

Key words: AlGa_N/Ga_N HEMT; microwave power; Si₃N₄; passivation

EEACC: 4130

Article ID: 0253-4177(2005)09-1804-04

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311903) and the Innovation Program of CAS (No. KGCX2-SW-107)

Chen Xiaojuan female, master candidate. She is engaged in research on compound semiconductor devices and circuits.

Liu Xinyu male, professor. He is engaged in research on compound semiconductor devices and circuits.

Received 11 January 2005, revised manuscript received 16 March 2005

© 2005 Chinese Institute of Electronics