

8W AlGaIn/GaN HEMT 功率器件的研制*

刘果果[†] 郑英奎 魏珂 李诚瞻 刘新宇 和致经

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 报道了基于国产衬底以及国产外延的 AlGaIn/GaN HEMT X 波段功率器件的研究进展. 利用国产衬底以及外延材料, 优化了器件栅场板的结构, 研制成功栅长 $0.35\mu\text{m}$, 栅宽为 1mm 的微波功率器件. 该器件输出电流密度达到 $0.83\text{A}/\text{mm}$, 击穿电压大于 100V , 跨导为 $236\text{mS}/\text{mm}$, 截止频率(f_T)达到 30GHz , 最大振荡频率(f_{max})为 32GHz , 8GHz 下在片进行连续波测试, 漏端电压为 40V 时测试得到功率增益 4.9dB , 输出功率达 8W , 功率附加效率(PAE)为 45% .

关键词: 氮化镓; 高电子迁移率晶体管; 微波功率; 栅场板

PACC: 7280E **EEACC:** 2570

中图分类号: TN325+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)07-1354-03

1 引言

GaN 作为第三代宽禁带半导体材料, 以其禁带宽度大(3.4eV)、击穿电压高($3.3\text{MV}/\text{cm}$)、二维电子气浓度高(大于 10^{13}cm^{-2})、饱和电子速度高($2.8 \times 10^7\text{cm}/\text{s}$)等特性在国际上受到广泛关注, AlGaIn/GaN HEMTs 的高频、高压、大功率特性使之在微波功率器件方面有着广阔的前景. 近年来, 在 GaN 器件功率特性方面的报道中, 小尺寸器件获得了很高的输出功率密度. 2006 年, Wu 等人报道了 4GHz 下输出功率密度 $40\text{W}/\text{mm}^2$ [1]; 2007 年国内报道的最高输出功率密度为 8GHz 下 $11.74\text{W}/\text{mm}^2$ [2]. 但是, 随着器件尺寸的增加, 栅宽达到毫米量级时, 器件的输出功率密度随之下降. 2006 年报道了 L 波段 144mm 电路输出功率达到 500W 以上[3], 2006 年国内报道的栅宽 1mm 器件的最高输出功率为 10.1W [4].

本文首次报道了在国产的 SiC 衬底以及国产外延材料上制作的 AlGaIn/GaN HEMT 结构, 实现了栅宽为 1mm 的微波功率管. 在制作过程中引入了栅场板结构[5], 降低了器件的电流崩塌效应, 使得制备的功率管在 8GHz 下, 连续波测试得到功率增益 4.9dB , 输出功率达 8W , PAE 为 45% .

2 器件结构与工艺

作者基于国产的 50mm SiC 单晶衬底, 采用金属有机物化学气相淀积技术(MOCVD)制备 AlGaIn/GaN 外延材料. 材料结构自下往上分别为 $3\mu\text{m}$ 的 GaN 缓冲层, 100nm 的高迁移率 GaN 层, 1nm 的 AlN 插入层, 20nm 的非掺杂 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$, 以及 1nm 的 GaN 帽层. 室温下霍尔测试得出, 二维电子气的浓度为 1.6×10^{13}

cm^{-2} , 迁移率为 $1320\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

器件结构如图 1 所示, 隔离采用了电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀. 器件的源漏金属组分采用了 Ti/Al/Ti/Au 的 4 层结构, 在 850°C N_2 氛围中退火 30s 形成欧姆接触, 实现比接触电阻率为 $10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 量级, 并且具有良好的形貌.

为了抑制电流崩塌效应, 获得更低的栅电阻, 本文采用优化的栅场版结构, 如图 1 所示. 利用 PECVD 淀积 SiN 钝化介质 120nm 实现 AlGaIn 表面钝化, 采用电子束光刻形成栅底部线条, 栅长为 $0.35\mu\text{m}$, 使用 ICP 刻蚀 SiN 介质; 再次采用电子束光刻形成栅帽线条, 如图 1 所示. 电子束蒸发栅金属 Ni/Au. 栅漏间的位于介质上的金属起到了场板调制的作用(L_{fp}), 本文采用了两种不同的长度 $0.7\mu\text{m}$ 和 $0.9\mu\text{m}$.

为了使布线能够承受大电流, 并降低器件的引线电阻, 整个器件在 Ti/Au 布线金属结构的基础上, 使用电镀工艺将布线金属加厚至 $2.5\mu\text{m}$. 同时, 使用新的电镀

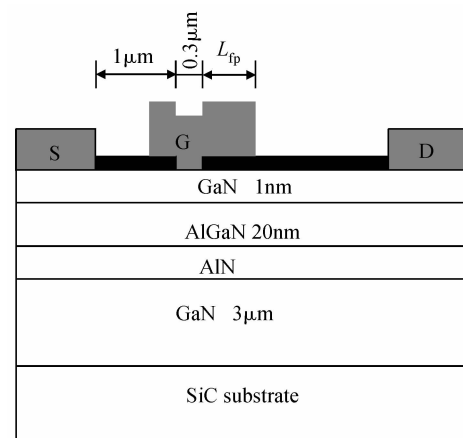


图 1 AlGaIn/GaN HEMTs 管芯结构示意图
Fig. 1 Schematic structure of the AlGaIn/GaN HEMTs

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2002CB311903)和中国科学院重点创新(批准号: KGCX2-SW-107)资助项目

[†] 通信作者. Email: liu_guoguo@163.com

2007-10-30 收到, 2007-12-20 定稿

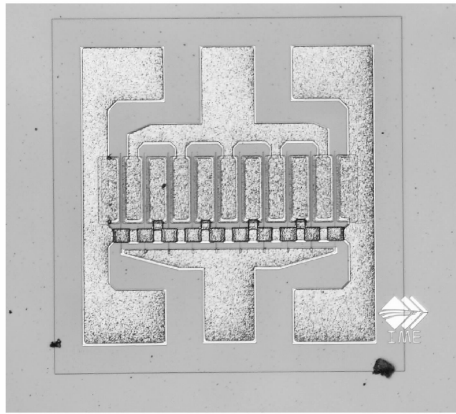


图 2 1mm SiC 基 AlGaIn/GaN HEMT 器件照片

Fig.2 Photo of a 1mm AlGaIn/GaN HEMT device based on SiC substrate

工艺形成空气桥,实现多指器件源区的连接,完成整个器件工艺流程.图 2 示出栅宽为 1mm 的 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件,器件采用十指结构,其中单指栅宽为 100 μ m.

3 结果与讨论

对制作完毕的 AlGaIn/GaN HEMTs 管芯进行了在片的直流、脉冲、小信号以及功率特性的测试.

采用 HP4155 对器件进行直流特性测试,图 3 示出栅宽为 60 μ m AlGaIn/GaN HEMT 在 V_g 从 -6V 到 1V 的输出特性曲线. $V_g = 1V$ 条件下,器件源漏输出电流密度达到 0.83A/mm. 输出电流达到饱和后,随着源漏电压的增加,输出电流并没有下降.这是由于 SiC 衬底热导率高,具有良好散热性能,使得 GaN 基 HEMTs 的自热效应得到有效的改善.

图 4 示出器件在漏端电压 6V 情况下的转移特性曲线.由图 4 观察到,AlGaIn/GaN HEMT 的阈值电压为 $V_{th} = -5V$. 在 $V_g = -3.5V$ 时,可得到最大跨导值约为 236mS/mm.

采用 HP8510C 网络分析仪和 Agilent IC-CAP 系统在片测试 AlGaIn/GaN HEMT 的小信号 S 参数,由

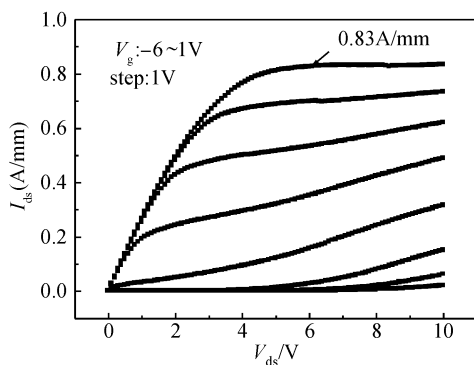


图 3 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 器件 I-V 特性

Fig.3 I-V characteristics of a 1mm AlGaIn/GaN HEMT device

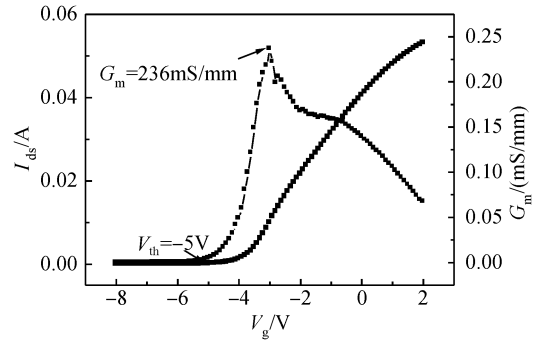


图 4 AlGaIn/GaN HEMT 转移和跨导特性

Fig.4 Transfer and transconductance characteristics of a 1mm AlGaIn/GaN HEMT device

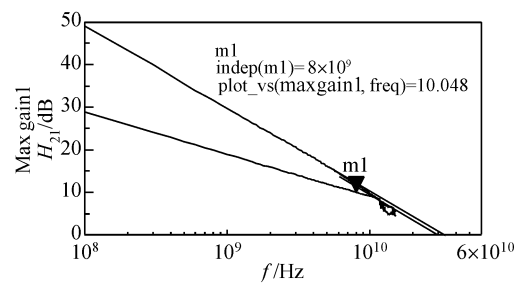


图 5 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 射频特性

Fig.5 RF characteristics of a 1mm AlGaIn/GaN HEMT device

得到的 S 参数推导出器件的短路电流增益 H_{21} 和单向最大可用功率增益 MAG. 图 5 示出栅宽为 1mm AlGaIn/GaN 功率器件的高频特性曲线. 在源漏电压 $V_{ds} = 20V$, 栅电压 $V_{gs} = -3V$ 的条件下,得到器件的电流增益截止频率为 30GHz,最大振荡频率为 32GHz.

采用 Focus 公司的 Load-pull 系统对 AlGaIn/GaN HEMT 微波功率性能进行在片测试. 图 6 示出工作频率为 8GHz 条件下栅宽 $W_g = 1mm$ 的 AlGaIn/GaN HEMTs 功率器件的输出功率随偏置漏电压的变化情况. 由于场板的引入减小了栅边缘的电场,我们可以在比较大的漏压下对器件进行功率特性的测试.

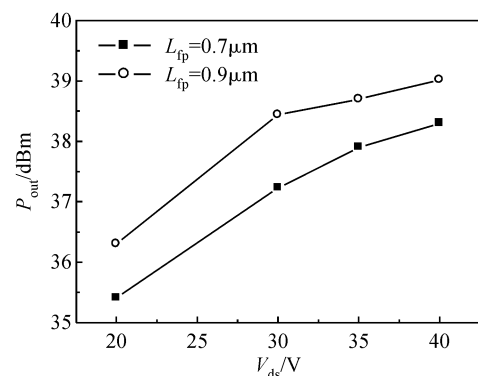


图 6 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 输出功率与工作电压的关系

Fig.6 Relations of output power and operation voltage of 1mm AlGaIn/GaN HEMTs devices

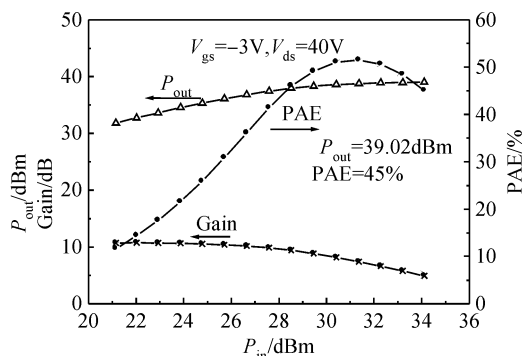


图 7 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 功率输出特性

Fig. 7 Power characteristics of a 1mm AlGaIn/GaN HEMT device

可以观察到,在相同的偏置条件下,栅场板长度为 $0.9\mu\text{m}$ 的 AlGaIn/GaN HEMT 有更大的输出功率,并且随着偏置漏电压的增大,栅场板长度为 $0.7\mu\text{m}$ 和 $0.9\mu\text{m}$ 的输出功率都几乎呈线性的增加。一方面, SiC 衬底良好的散热性能,使得 AlGaIn/GaN HEMTs 的自热效应得到有效的改善,偏置电压的增加引起的热效应对器件的功率输出并没有明显的影响。另一方面,优化的钝化介质和引入栅场板结构在一定程度上能抑制 AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌效应,有效地排除偏置电压增加所引起的电流崩塌效应,从而使得随着偏置漏电压的增加,器件的输出功率几乎呈线性增加。

图 7 示出栅宽 $W_g = 1\text{mm}$ 、栅场板长度 $L_{fp} = 0.9\mu\text{m}$ 的 AlGaIn/GaN HEMT 的功率特性曲线,其中器件的工作频率为 8GHz ,偏置条件为栅电压 $V_g = -3\text{V}$,漏电压 $V_d = 40\text{V}$ 。器件的线性增益为 10.7dB ,当输入功率为 34.11dBm 时,器件的连续波最大输出功率达到 39.02dBm ,约为 8W ,这是目前报道的基于国产 SiC 衬底和国产 GaN 基外延材料的 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件的最高输出功率;当器件的输出功率

达到最大值时,对应的功率附加效率高达 45% ,功率增益为 5dB 。

4 结论

报道了在国产的 SiC 衬底以及国产外延材料上制作的 AlGaIn/GaN HEMT 结构,实现了栅宽为 1mm 的微波功率管。其栅长为 $0.35\mu\text{m}$,引入了栅场板结构。该器件输出电流密度达到 0.83A/mm ,跨导为 236mS/mm ,截止频率(f_T)达到 30GHz ,最大振荡频率(f_{max})为 32GHz ,在 X 波段, 8GHz 下,在片进行连续波测试,漏端电压为 40V 时测试得到输出功率达 8W ,功率增益为 4.9dB 。栅场板的引入大大提高了器件在高频端的功率输出能力。下一步研究的重点为凹栅槽器件的制备,目的是提高器件的线性度,同时细化场板结构,得到更高的输出功率。

参考文献

- [1] Wu Y F, Moore M, Saxler A, et al. 40-W/mm double field-plated GaN HEMTs. Device Research Conference, 2006: 151
- [2] Zhang Zhiguo, Feng Zhen, Yang Mengli, et al. Recess-gate AlGaIn/GaN HFET. Chinese Journal of Semiconductors, 2007, 28(9): 1420 (in Chinese) [张志国, 冯震, 杨梦丽, 等. 凹栅 AlGaIn/GaN HFET. 半导体学报, 2007, 28(9): 1420]
- [3] Maekawa A, Yamamoto T, Mitani E, et al. A 500W push-pull AlGaIn/GaN HEMT amplifier for L-band high power application. IEEE MTT-S, 2006: 722
- [4] Chen Chen, Chen Tangsheng, Ren Chunjiang, et al. Recessed-gate AlGaIn/GaN HEMTs with field-modulating plate. The 14th Conference of Compound Semiconductor Material, Microwave Devices and Photoelectric Devices, 2006: 325 (in Chinese) [陈辰, 陈堂胜, 任春江, 等. 凹栅槽场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 特性分析. 第十四届全国化合物半导体、微波器件和光电器件学术会议, 2006: 325]
- [5] Ando Y, Okamoto Y, Miyamoto H, et al. 10-W/mm AlGaIn-GaN HFET with a field modulating plate. IEEE Electron Device Lett, 2003, 24(5): 289

An 8W X Band AlGaIn/GaN Power HEMT*

Liu Guoguo[†], Zheng Yingkui, Wei Ke, Li Chengzhan, Liu Xinyu, and He Zhijing

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

Abstract: AlGaIn/GaN HEMTs at the X band based on homemade SiC substrates and homemade epi-layers are first reported. A $0.35\mu\text{m}$ gate length, 1mm gate width microwave power device is produced with a gate-connected field plate. The power device exhibits a maximum drain current density as high as 0.83A/mm and a peak extrinsic transconductance of 236mS/mm . A unity current gain cutoff frequency(f_T) of 30GHz and a power gain cutoff frequency of 31GHz are obtained. The device biased at a drain voltage of 40V demonstrates a continuous wave saturated output power of 8W with a gain of 4.9dB and a power-added efficiency of 45% at 8GHz .

Key words: AlGaIn/GaN; HEMT; microwave power; gate-connected field plate

PACC: 7280E **EEACC:** 2570

Article ID: 0253-4177(2008)07-1354-03

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

[†] Corresponding author. Email: liu_guoguo@163.com

Received 30 October 2007, revised manuscript received 20 December 2007

©2008 Chinese Institute of Electronics