

高性能 1mm AlGa_N/Ga_N 功率 HEMTs 研制*

邵 刚¹ 刘新宇¹ 和致经¹ 刘 键¹ 魏 珂¹ 陈晓娟¹ 吴德馨¹ 王晓亮² 陈 宏³

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(3 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要: 报道了基于蓝宝石衬底的高性能 1mm AlGa_N/Ga_N HEMTs 功率器件. 为了提高微波功率器件性能, 采用新的欧姆接触和新型空气桥方案. 测试表明, 器件电流密度为 0.784A/mm, 跨导 197mS/mm, 击穿电压大于 40V, 截止态漏电流较小, 1mm 栅宽器件的单位截止频率达到 20GHz, 最大振荡频率为 28GHz, 功率增益为 11dB, 功率密度为 1.2W/mm, PAE 为 32%, 两端口阻抗特性显示了在微波应用中的良好潜力.

关键词: AlGa_N/Ga_N; HEMT; 微波功率; 单位截止频率

EEACC: 2560S

中图分类号: TN325⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)01-0088-04

1 引言

AlGa_N/Ga_N 高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 在高频高温大功率领域具有十分引人瞩目的应用前景^[1,2]. AlGa_N/Ga_N 是国际上广泛关注的新型宽禁带化合物半导体材料, 具有较宽的禁带宽度 (Ga_N 3.4eV, Al_N 6.2eV), 较高的击穿场强 ($1 \sim 3 \times 10^{10}$ V/cm), 高电子饱和漂移速率 (2.2×10^{10} cm/s), 以及良好的热稳定性. 与此同时, AlGa_N/Ga_N 异质结具有较大的导带不连续性, 注入效率较高, 界面处又有强烈的自发极化与压电极化效应, 2DEG 可达到很高的电子密度 (不掺杂可达 10^{13} cm⁻²). 因此, 凭借优良的材料特性及制作工艺水平的提高, Ga_N 基器件可达到比 GaAs 器件大 5~10 倍的微波功率密度. 目前国际上报道的 Ga_N 单指 HEMTs 器件 10GHz 下连续波功率密度可达 10.7W/mm, PAE 约 40%^[3], 在 20GHz 下, 0.3 μ m 器件 CW 测试功率密度可达到 3W/mm, PAE 为 22.5%^[4]. SiC 衬底 Ga_N 单指器件的单位截止频率 f_T 大于 160GHz, 蓝宝石衬底 f_T 大于 110GHz. 我国的 Ga_N 器件研究工作开展得还较少^[5,6]. 本文报道的利用我国自行生长的蓝宝石衬

底 Al_xGa_{1-x}N/Ga_N 异质结材料, 研制出大尺寸 Ga_N HEMT 器件, 栅长 0.8 μ m, 总栅宽 1mm, 跨导 197mS, 击穿电压 $V_{BR} > 70$ V, f_T 达 20GHz, 最大振荡频率 f_{max} 达 28GHz.

2 器件结构与工艺

50mm AlGa_N/Ga_N 外延材料由中国科学院半导体所和物理所提供, 采用金属有机物化学气相淀积技术 (MOCVD) 制备, 衬底为蓝宝石. 材料结构为 3.5 μ m 的 Ga_N 缓冲层, 110nm 的高迁移率 Ga_N 层, 23nm 的不掺杂 AlGa_N, Al 组分为 20% 左右. 霍尔测试得出室温下二维电子气的浓度为 1.3×10^{13} cm⁻², 迁移率为 1120cm²/(V·s).

器件隔离使用 ICP 干法刻蚀实现, 如图 1 所示. 源漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ti/Au 金属结构, 并在 730 N₂ 氛围中退火 50s, 传输线测试欧姆接触电阻率为 8.86×10^{-6} cm², 并且具有良好的形貌. 栅采用 Pt/Ti/Au, 源漏间距 5 μ m, 偏栅结构. 为了使布线金属能够承受大电流, 并降低器件的引线电阻同时增大正面散热面积, 整个器件使用电镀工艺将布线金属加厚至 2.5 μ m, 并使用新的电镀空气桥实现源

*国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2002CB311903), 中国科学院重点创新 (批准号: KG CX2-SW-107) 资助项目

邵 刚 男, 硕士研究生, 主要研究方向是 AlGa_N/Ga_N 器件与电路.

2003-12-30 收到, 2004-03-31 定稿

区的连接,减小栅源寄生电容.最后以 Si₃N₄ 钝化表面,器件的最终形貌如图 2 所示.

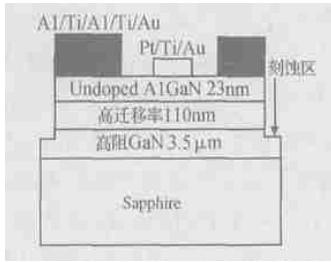


图 1 AlGaIn/ GaN HEMTs 截面示意图

Fig. 1 Cross section of AlGaIn/ GaN HEMTs

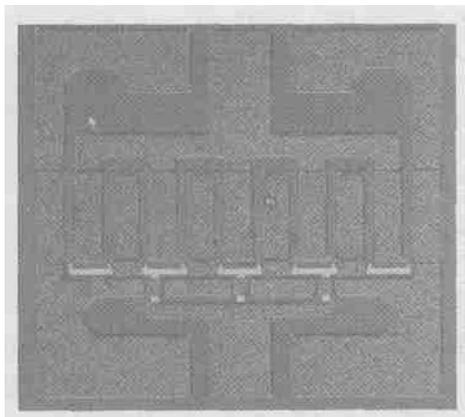


图 2 栅长 0.8 μm 的 1mm AlGaIn/ GaN HEMT 功率器件

Fig. 2 Photo of power device with total gate width 1mm and gate length 0.8 μm

3 结果与讨论

同一批流片不同版图和结构的测试结果有所差异,本文给出较好结构的性能.

I-V 特性采用脉冲测试防止器件过热,测试条件栅电压 V_{gs} 为 -5 ~ 0.5V,步长 0.5V,源漏偏压 0 ~ 10V. 脉冲测试结果如图 3 所示,器件的最大饱和电流约 784mA,折合单位电流密度 0.784A/mm,截止电压约 -4.0V.

受设备量程限制,击穿采用单指器件测试, V_{ds} 增至 40V 未见击穿,10 指器件截止态击穿电压 > 70V. 通过 Cripps 方法^[7]

$$P_{out} = I_{max} (V_{br} - V_{knee}) / 8$$

估算器件在 Class A 偏置 40V 下的最大输出功率密度约 3.5W/mm.

器件在截止态仅有微安级的漏电及较高的关态击穿电压 (> 70V),显示了 GaN 缓冲层良好的绝缘

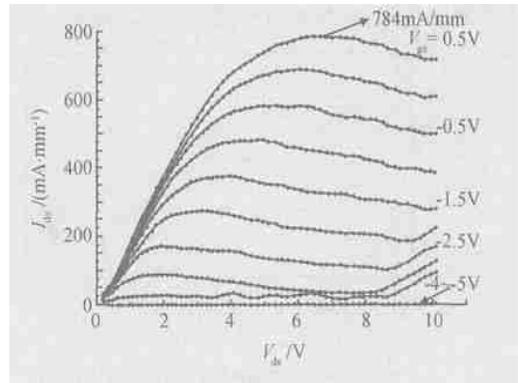


图 3 1mm AlGaIn/ GaN HEMT 功率器件 *I-V* 特性

Fig. 3 *I-V* characteristics of 1mm gate width AlGaIn/ GaN power HEMTs

特性,有利于高电压应用.器件的膝点较低 ($V_{knee} < 4.0V$),这与良好的欧姆接触 ($8.86 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$) 及较低的金布线电阻有关.但在高偏压大电流下 I_{ds} 降低,表明蓝宝石衬底器件在大功率下的散热性能较差,热阻的增加使得电流降低.

采用 HP 4142 和 Agilent ICCAP 测试系统测试得到的传输与跨导特性如图 4 所示. 偏置条件为源漏电压 $V_{ds} = 7V$,栅源电压 V_{gs} 从 -5V 至 0.5V. 从图中看出,单位跨导 g_m 的峰值出现在 $V_{gs} = -2V$,钝化后器件跨导达到 197mS/mm. 较高的跨导与器件较低的欧姆接触电阻率,厚金属布线的低电阻率以及钝化后栅区表面电子陷阱的减少有关.

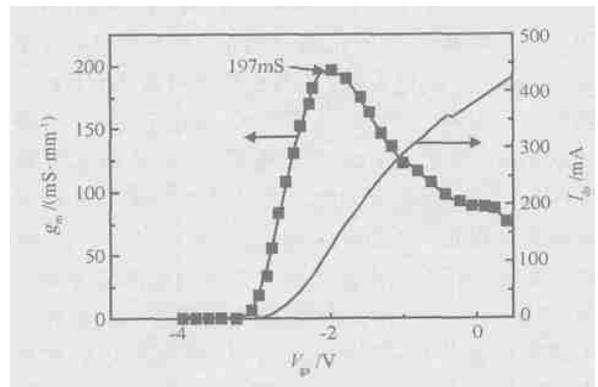


图 4 1mm 器件传输与跨导特性

Fig. 4 Transfer characteristics and transconductance of large device with total gate width 1mm

器件的高频特性测试采用 HP 8510C 网络分析仪与 Agilent ICCAP 系统,测试扫描频率 100MHz 至 20.1GHz,源漏电压 $V_{ds} = 10V$,栅电压 V_{gs} 选择最高峰值跨导对应的 -2V,正向电流增益 (H_{21}) 和最大

功率可用增益(MAG)分别如图 5,6 所示.

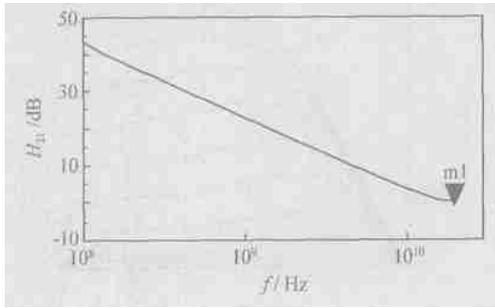


图 5 正向电流增益 (H_{21})

Fig. 5 Forward current gain (H_{21})

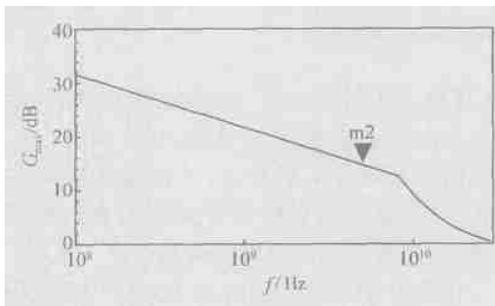


图 6 最大功率可用增益 (MAG)

Fig. 6 Maximum available gain versus frequency

从图 5 可以看出, f_T 实际测量值约 20GHz, MAG 在测量上限 20.1GHz 内未到单位增益点 0dB, 使用 20dB/十倍频程斜率外推得到 f_{max} 约 28GHz, 这是国内首次对 1mm AlGaIn/GaN HEMT 功率器件频率特性的报道. 国际上栅长 0.6 μ m, 栅宽 300 μ m 的 GaN 器件, 其截止频率可达 27GHz^[8]. 国内栅长 1 μ m 单指 GaN 器件 f_T 可达 19GHz^[9], 栅长 0.8 μ m, 栅宽 200 μ m 的 2 指器件, 截止频率可到 20GHz^[10], 而栅宽较大的功率器件的频率特性在国内尚未见报道. 比较可看出, 在总栅长 1mm 下, 器件的高频特性并未由于串扰及寄生效应的增大而下降, 显示了良好的频率特性. 这主要得益于对器件细节的优化设计和工艺的改进: (1) 栅上信号衰减最大, 多栅柄结构使得信号在栅宽方向衰减更小, 相位一致性好; (2) 优化栅源和栅漏间距, 减小了热效应和沟道电阻的影响; (3) 使用新型的空气桥布线减小了对器件单位增益带宽影响最大的栅源引线交叠电容 C_{gs} ; (4) 较好的欧姆接触性能和电镀厚金属引线技术的应用使器件跨导由 122mS/mm 提高到 179mS/mm. 这与源漏接触电阻减小以及引线电阻的减小, 尤其是减小了源电阻的负反馈作用, 缩短对地通路减小了源寄生电感有关.

通过对该 1mm 器件两端口 S 参数的分析可知, 4GHz 时器件的输入端口 S_{11} 仍表现出输入阻抗实部较小(约 5 Ω), 虚部较大, 但输出阻抗具备较大的实部值约 33 Ω , 而虚部值则较小, 输出端口在 4GHz 下功率反射小于 -12dB. 相比 GaAs 器件, 即使是较小的输入阻抗实部值仍然相对较大. 由此特性, 该 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的阻抗转换比 (Z_L/Z_S) 较小, Q 值小, 匹配网络的设计相对容易, 且更容易实现宽频放大. 在理想匹配情况下, 4GHz 时的功率增益可达 15.68dB. 未采取有效散热措施的器件连续波测试, 2GHz 下, 40V 偏压, Class AB 偏置, 器件输出功率 1.2W, 功率增益 11dB, PAE 32%. 器件性能受热效应及测试设备最大输入功率限制, 因而散热将是今后研究的一个重点.

4 结论

在蓝宝石衬底上设计并实现了 AlGaIn/GaN 微波功率 HEMTs, 器件栅长 0.8 μ m, 总栅宽 1mm, 单位跨导达到 197mS/mm, 并具备 >40V 的关态击穿电压及很小的漏电流. 微波测试表明, 单位截止频率 f_T 为 20GHz, 最高振荡频率 f_{max} 为 28GHz, 两端口 S 参数显示该 1mm AlGaIn/GaN 功率器件具有较高的端口阻抗, 便于匹配网络的实现. 2GHz 下, 器件输出功率 1.2W, 功率增益 11dB, PAE 32%, 显示了良好的微波应用前景.

参考文献

- [1] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, et al. Very-high power density AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48:586
- [2] Sheppard S T, Doverspike K, Pribble W L, et al. High power microwave GaN/AlGaIn HEMT's on silicon carbide. IEEE Electron Device Lett, 1999, 20:161
- [3] 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
- [4] Vescan A, Dietrich R, Wieszt A, et al. AlGaIn/GaN MOD-FET's on semi-insulating SiC with 3W/mm at 20GHz. Electron Lett, 2002, 36:1234
- [5] 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]

- [6] Zhang Xiaoling ,L ü Changzhi ,Xie Xuesong ,et al. Research on Al-GaN/ 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]
- [7] Walker J L B. High-power GaAs FET amplifiers. Artech House ,1993
- [8] Wu Y F ,Chavarkar P M ,et al. Linearity and gain characteristics of AlGaIn/ GaN HEMTs. IEEE IEDM Technical Digest ,2002 :697
- [9] Xiao Dongping ,Liu Jian ,Wei Ke ,et al. High transconductance Al-GaN/ GaN HEMT grown on sapphire substrates. Chinese Journal of Semiconductors ,2003 ,24(9) :907
- [10] 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]

Development of High Performance 1mm Gate Width AlGaIn/ GaN Power HEMTs *

Shao Gang¹ , Liu Xinyu¹ , He Zhijing¹ , Liu Jian¹ , Wei Ke¹ , Chen Xiaojuan¹ ,
Wu Dexin¹ , Wang Xiaoliang² , and Chen Hong³

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

(2 Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100083 , China)

(3 Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

Abstract : An high performance AlGaIn/ GaN power heterostructure field effect transistors(HEMTs) on sapphire substrate with total gate width 1mm is reported. New ohmic contact structure and air bridge are employed to improve microwave power performance. A saturated current density of 0.784A/mm ,a peak transconductance of 197mS/mm ,a break down voltage of up to 40V and a small leakage current under cutoff state are obtained. The 1mm gate width power device also displays a unit cutoff frequency(f_T) of 20GHz and a maximum oscillation frequency f_{max} of 28GHz ,and also an output power 1.2W ,a power gain 11dB ,a PAE 32 % in 2GHz. Port impedance characteristics show the potential for the applications of microwave field.

Key words : AlGaIn/ GaN ; heterostructure field effect transistors (HEMTs) ; microwave power ; unit cutoff frequency

EEACC : 2560S

Article ID : 0253-4177(2005)01-0088-04

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311903) and Key Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KGX2-SW-107)

Shao Gang male ,master candidate. His current research interest is AlGaIn/ GaN microwave device and circuit.

Received 30 December 2003 ,revised manuscript received 31 March 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics