

金属,并在 870℃,N₂ 气氛中进行了 30s 快速热退火,TLM 图形测试得到接触电阻为 0.4Ω·mm,与国外同类器件欧姆接触水平相当.器件隔离采用硼离子注入隔离实现,隔离方块电阻大于 10¹¹Ω/□.近年来在器件结构上采用场板使得 AlGaIn/GaN HEMT 微波功率特性取得了突破^[4],场板的引入减小了器件栅电极靠漏极一侧电场的峰值强度,有助于在器件击穿电压提高的同时减小栅漏间强电场引起的陷阱效应,从而提高器件在射频工作时电流和电压摆幅,但如前所述,引入场板不利的一面是将降低器件增益,而凹槽栅可以有效地补偿场板引起的增益下降.为实现图 1 所示的凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT,器件源漏欧姆接触完成后在器件表面上用 PECVD 淀积一层 SiN 介质层,采用电子束刻写 0.35μm 栅脚(gate foot),利用氟基气体干法刻蚀 SiN 介质层,利用氯基气体刻蚀 GaN 帽层和部分 AlGaIn 势垒层来形成凹槽,接着是采用电子束刻写套刻栅帽同时形成场板,肖特基势垒接触采用 Ni/Au.最后用 PECVD 再次淀积一层 SiN 以实现器件的保护,电镀 Au 层对器件各个电极进行加厚并完成空气桥制作.

3 器件的直流特性和动态 I-V 特性

图 2 为研制的凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的转移特性曲线,同时还给出了未采用凹槽栅器件的转移特性曲线,测试器件的栅宽均为 100μm.凹槽栅的采用使得器件的夹断电压由 -5.4V 下降为 -3.6V,而跨导则相应地由 216mS/mm 提高到 325mS/mm,跨导的增大必将改善器件频率特性,提高器件功率增益.采用凹槽栅器件的饱和漏电流 I_{ds} 由 1.04A/mm 下降到了 0.88A/mm,而栅偏置 $V_{GS} = +2V$ 时的最大电流 I_{max} 为 1.30A/mm,比未采用凹槽栅器件的 1.23A/mm 还要大.

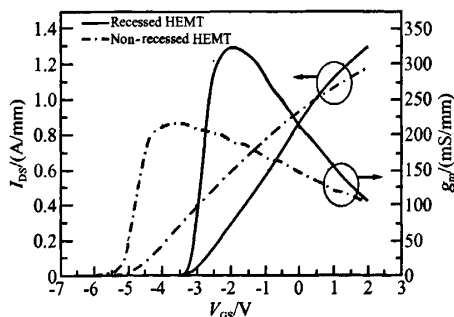


图 2 研制的 AlGaIn/GaN HEMT 的 I_{DS} 和 g_m 随 V_{GS} 的变化
Fig. 2 I_{DS} and g_m versus V_{GS} of the developed AlGaIn/GaN HEMT

图 3 比较了采用凹槽和未采用凹槽两种器件栅-漏反向击穿特性的测试结果,采用凹槽结构后器件的击穿电压由未采用凹槽栅器件的 60V 左右提高到了 90V 以上.

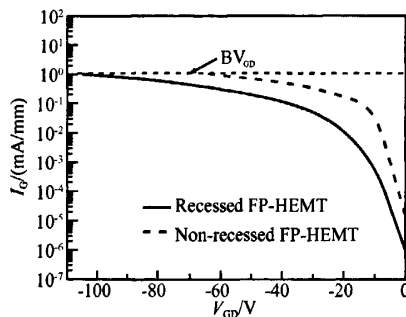


图 3 研制的 AlGaIn/GaN HEMT 的击穿特性
Fig. 3 Breakdown properties of the developed AlGaIn/GaN HEMT

电流崩塌是限制 AlGaIn/GaN HEMT 微波功率输出能力的主要障碍,动态 I-V 测试能有效反映器件在高频、高电压条件下的电流崩塌现象^[6].图 4(a)给出了本实验室采用的 Accent 公司 DIVA D265 型晶体管动态 I-V 特性测试仪的测试原理图,脉冲电压的脉宽最小可达到 200ns,占空比只有 0.04%,这样不仅可消除器件的自热效应对测试结果的影响,同时还可以保证在 I-V 特性中每个点的测试之前器件的状态是重复一致的.动态 I-V 特性的测试是设置器件的静态工作点 V_{GQ} 和 V_{DQ} ,通常 V_{GQ} 和 V_{DQ} 分别选取为器件的夹断电压和器件的工作电压.在动态 I-V 特性的测试过程中,每完成一个数据点测试,器件均回到这一偏置状态,因此与 DC I-V 特性测试不同的是,在动态 I-V 特性测试中,每进行一个新的数据点的测试,器件都存在一个由夹断状态到开启状态的变化,在 200ns 的脉宽内,器件沟道的开启程度将决定沟道电流的大小.图 4(b)为测得的本项目研制的 1mm 凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的动态 I-V 特性,测试中所用器件栅宽均为 1mm,脉冲电压的脉宽为 200ns,占空比为 0.04%,栅上静态偏置电压 $V_{GQ} = V_{GS(off)} - 1V$,使器件处于夹断状态,结果表明漏上静态偏置 $V_{DQ} = 10V$ 时,器件在 $V_{GS} = +2V$ 时的最大电流 I_{max} 为 1.34A/mm, V_{DQ} 提高到 20V 时, I_{max} 下降为 1.32A/mm, V_{DQ} 为 30V 时, I_{max} 则为 1.30A/mm,器件的最大电流随漏上偏置电压提高略有下降,但变化不大,同时与直流测试结果接近,说明该器件很好地抑制了电流崩塌.

图 5 比较了三种不同结构的 AlGaIn/GaN HEMT 由动态 I-V 测试的 I_{max} ($V_{GS} = +2V$) 与漏上静态偏置电压 V_{DQ} 的关系.结果表明未采用场板

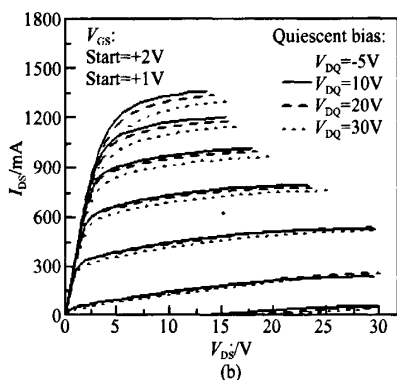
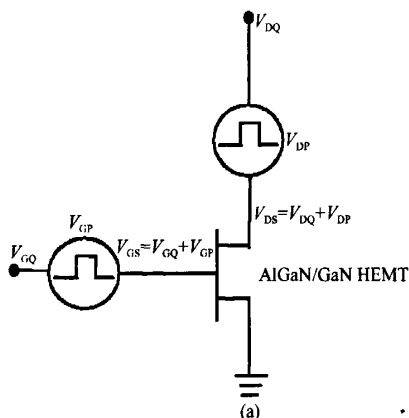


图 4 (a) 动态 I - V 特性测试示意图; (b) 1mm 栅宽凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的动态 I - V 特性

Fig. 4 (a) Measurement schematic of dynamic I - V curve; (b) Measured dynamic I - V curves of the 1mm gate width recessed-gate AlGaIn/GaN HEMT with FP

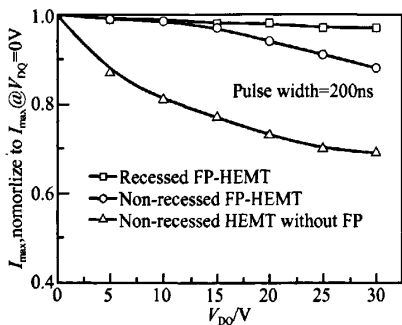


图 5 不同器件的动态最大饱和漏电流随漏静态偏置电压变化
Fig. 5 Dynamic maximum drain currents versus drain quiescent bias voltage for different devices

器件的 $I_{\max}$ 随漏上偏置电压提高而迅速下降, 即器件电流崩塌随着偏置电压提高而变得更加严重; 而采用场板后, 器件 $I_{\max}$ 在 $V_{DQ} = 0 \sim 15V$ 范围内下降幅度小于 3%, 证明场板的引入能够有效抑制电流

崩塌. 采用场板结构的器件中, 未采用凹槽栅的器件从 20V 左右开始 $I_{\max}$ 也开始以较大幅度下降, 30V 时下降幅度超过了 10%, 而采用凹槽栅的器件在 30V 时 $I_{\max}$ 下降幅度依然低于 3%, 表明凹槽栅的采用能进一步抑制器件的电流崩塌.

4 器件的微波性能

对研制的栅宽为 100 μm 的凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 进行了在片微波小信号 S 参数测试, 由小信号 S 参数推导出器件短路电流增益 $|h_{21}|$ 和最大资用功率增益 MAG 随频率的变化, 如图 6 所示. 结果表明该器件的电流增益截止频率 f_T 为 30GHz, 外推其最高振荡频率 $f_{\max}$ 为 60GHz.

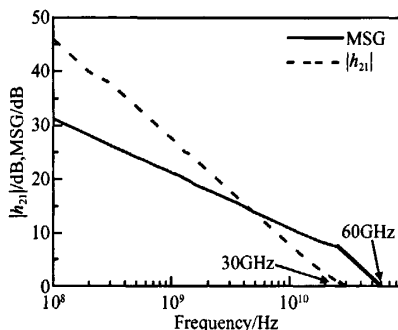


图 6 研制的凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的 $|h_{21}|$ 和 MAG 随频率的变化

Fig. 6 $|h_{21}|$ and MAG versus frequency for the developed recessed-gate AlGaIn/GaN HEMT with FP

将三种不同结构的 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 装配在金属管壳内进行了微波功率特性测试, 图 7 为饱和输出功率与工作电压的关系. 同时具有凹槽栅和场板结构的器件, 由于较好地抑制了电流崩塌, 保证了器件在射频工作时的电流摆幅, 使输出功率随工作电压摆幅增大而近似呈线性增长, 而其他两种器件由于表现了不同程度的电流崩塌, 器件在射频工作时电流摆幅随着工作电压提高而被压缩, 抵消了工作电压摆幅的增加, 输出功率过早出现饱和. 图 8 给出了栅宽为 1mm 的凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 在 8GHz、工作电压 $V_{DS} = 34V$ 时的输出功率 P_{out} 、功率增益 (Gain) 和功率附加效率 (PAE) 随输入功率 P_{in} 的变化. 当 P_{in} 为 32.06dBm 时, 输出功率为 39.56dBm, 输出功率密度为 9.05W/mm, 功率增益为 7.5dB, 功率附加效率为 46%.

5 结论

研制的 SiC 衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT,

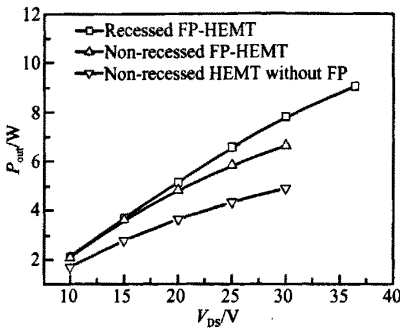


图7 1mm栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 输出功率随工作电压的变化

Fig. 7 Output power versus operation voltage of 1mm gate width AlGaIn/GaN HEMTs

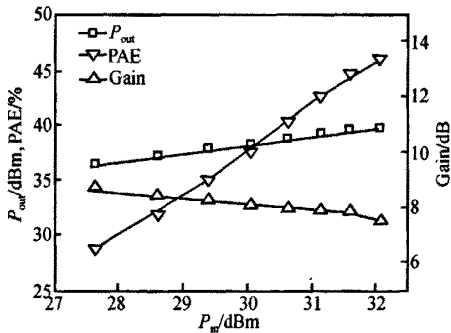


图8 1mm栅宽凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的输出功率、功率增益和功率附加效率随输入功率 P_{in} 的变化

Fig. 8 Output power, power gain and power-added efficiency versus input power of the developed 1mm gate width recessed-gate AlGaIn/GaN HEMT with FP

工艺中结合了凹槽栅和场板结构的优点,提高了器件的击穿电压并有效抑制了器件的电流崩塌,提升了器件的微波功率性能.微波功率测试表明,1mm栅宽的该器件在 8GHz, 34V 时输出功率达到了 9.05W,功率增益为 7.5dB,功率附加效率为 46%.这是目前采用国产 GaN 外延材料研制的 AlGaIn/GaN HEMT 的最好器件结果,进一步的器件可靠性研究工作还在进行之中.

致谢 本文研制的器件工艺由单片集成电路与模块国家重点实验室完成,并得到了南京电子器件研究所 GaAs 工程中心的协助,外延材料由中国科学院半导体研究所完成.

参考文献

- [1] Vetury R, Zhang N Q, Keller S, et al. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFET. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 560
- [2] Green B M, Chu K K, Chumbe E M, et al. The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Electron Device Lett*, 2000, 21(6): 268
- [3] Vertiatchikh A V, Eastman L F, Schaff W J, et al. Effective of surface passivation of AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor. *Electron Lett*, 2002, 38(8): 388
- [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 T, et al. High-power recessed-gate AlGaIn-GaN HFET with a field-modulating plate. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 51(12): 2217
- [6] Koudymov A, Simin G, Khan M A, et al. Dynamic current-voltage characteristics of III-N HFETs. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(11): 680

Recessed-Gate AlGaIn/GaN HEMTs with Field-Modulating Plate

Chen Tangsheng^{1,†}, Wang Xiaoliang², Jiao Gang¹, Zhong Shichang¹, Ren Chunjiang¹,
Chen Chen¹, and Li Fuxiao¹

(1 National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing
Electronic Devices Institute 210016, China)

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

Abstract: AlGaIn/GaN HEMTs on SiC substrate have been fabricated. Recessed-gate and field-modulating plate configuration have been used to suppress the current collapse and to improve breakdown voltage and power performance of the devices. The developed 1-mm gate width device exhibits a saturated output power of 9.05W with a power gain of 7.5dB and a power-added efficiency (PAE) of 46% at 8GHz and 34V drain bias.

Key words: wide band-gap semiconductor; AlGaIn/GaN; HEMTs; field modulating plate; gate recess
EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0398-04

† Corresponding author. Email: chentsh@vip.sina.com

Received 12 December 2006, revised manuscript received 28 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics