

凹槽栅场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 特性分析

陈 辰^{1,2,†} 陈堂胜² 任春江² 薛舫时²

(1 南京大学物理系, 南京 210008)

(2 单片集成电路和模块国家级重点实验室, 南京 210016)

摘要: 研究了无场调制板结构、有场调制板结构但无凹槽栅、结合场调制板结构和凹槽栅工艺三种 AlGaIn/GaN HEMT 的动态 I-V 特性和微波特性, 认为场调制板结构和凹槽栅工艺可以有效改善 AlGaIn/GaN HEMT 器件沟道内电场分布, 显著减小电流崩塌现象, 提高器件的微波输出功率特性. 利用此技术研制的 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 输出功率大于 10W.

关键词: AlGaIn/GaN; 高电子迁移率晶体管; 场板; 凹槽栅; 动态测试

EEACC: 2560S

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)S0-0407-04

1 引言

GaN 微波功率器件由于其高输出功率密度、高工作电压等特点, 近年来得到了广泛关注, 其作为新一代微波固态功率器件, 具有广阔的应用前景.

AlGaIn/GaN HEMT 异质结界面的强极化场和大的导带偏移导致产生高密度二维电子气, 能够产生大漏电流, 而且增强了栅对电子气的控制能力, 提高了器件的跨导. 但是由于电流崩塌等现象的影响, 其在高频工作时输出功率受到制约, 优异性能不能得到充分发挥. 电流崩塌通常被认为是由于沟道中电子被器件表面态捕获, 并在栅漏间半导体表面形成一不受控虚栅所致^[1]. AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌现象可以通过材料结构、器件结构、工艺步骤等方面来加以抑制. 如可以采用 SiN 钝化^[2], 研究表明 SiN 钝化可以有效降低器件表面态密度^[3], 从而减小由表面态引起的电流崩塌. SiN 钝化虽然抑

制了 AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌, 但同时使得器件击穿电压明显下降, 影响了输出功率. 而场板结构(field plate)的引入可有效补偿 SiN 钝化引起的击穿下降. 为补偿场板引入导致的增益降低, 可以考虑采用凹槽栅工艺^[4]结合场板结构, 对栅下内外沟道分别调制, 降低电场峰值.

本文作者研制了 3 种 AlGaIn/GaN HEMT: (1)无场调制板结构; (2)有场调制板结构但无凹槽栅; (3)结合场调制板结构和凹槽栅工艺. 通过对比此 3 种情况的静态、动态直流特性和微波特性, 讨论了场调制板结构和凹槽栅工艺对 AlGaIn/GaN HEMT 器件性能的影响.

2 器件结构与工艺

图 1 给出了 3 种结构的 AlGaIn/GaN HEMT 示意图. 器件研制中采用的 AlGaIn/GaN 异质结材料为金属有机化合物气相淀积技术在半绝缘的 SiC

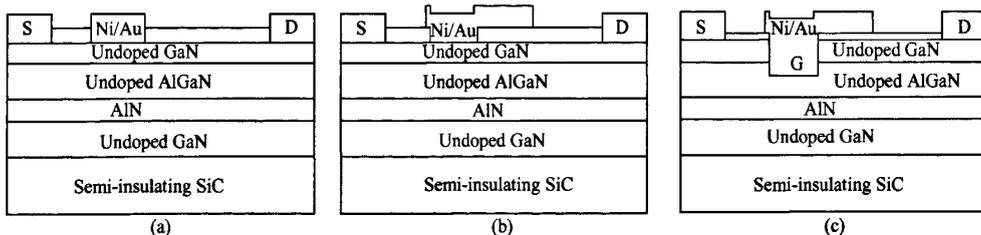


图 1 凹槽栅场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 示意图 (a) 无场调制板结构; (b) 有场调制板结构但无凹槽栅; (c) 结合场调制板结构和凹槽栅工艺

Fig. 1 Schematic of recessed-gate AlGaIn/GaN HEMT with field modulating plate (a) Non-recessed HEMT without FP HEMT; (b) Non-recessed FP HEMT; (c) Recessed FP HEMT

† 通信作者. Email: chenc55@sina.com

2006-11-16 收到

衬底外延得到, 该外延结构包括 AlN 成核层、GaN 缓冲层、AlN 隔离层、AlGaIn 势垒层和 GaN 帽层, 各层均未掺杂, AlGaIn 势垒层中 Al 的摩尔含量为 0.25.

AlGaIn/GaN HEMT 器件工艺中首先是源漏欧姆接触制作, 采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au 多层金属, 接触电阻为 $0.4\ \Omega \cdot \text{mm}$. 器件隔离采用硼离子注入实现, 隔离方块电阻大于 $10^{11}\ \Omega/\square$.

3 实验结果与讨论

3.1 静态直流特性

图 2(a) 和 (b) 为未采用和采用凹槽栅结构 AlGaIn/GaN HEMT 的直流 I - V 特性, 测试中所采用的器件栅宽为 $100\ \mu\text{m}$. 未采用凹槽栅器件在栅偏置 $V_{GS} = +2\text{V}$ 时最大电流 I_{max} 为 123mA , 而采用凹槽栅器件在 $V_{GS} = +2\text{V}$ 时最大电流 I_{max} 为 130mA , 考虑到材料和工艺的不均匀性, 可以认为两者最大电流近似相等. 但是此两种器件的夹断电压明显不

同, 相应的器件最大跨导 g_m 由 216mS/mm 提高到了 325mS/mm , 跨导增大将直接改善器件频率特性, 提高器件增益. 因此使用凹槽栅工艺, 可以让栅电极靠近沟道, 提升栅的控制能力, 提高夹断电压, 提高跨导, 抑制电流崩塌.

3.2 动态 I - V 特性测试

本文利用 Accent 公司生产的 DIVA D265 型脉冲响应测试系统, 通过漏信号对栅脉冲信号的动态响应来研究器件的电流崩塌^[5]. 动态(脉冲)测试首先要选择一个静态的偏置工作点 (V_{GQ}, V_{DQ}), 脉冲响应测试系统以此工作点为初始点, 通过分别在栅极和漏极再加上一个同步短脉冲 (V_{GP}, V_{DP}), 此时 $V_{GS} = V_{GQ} + V_{GP}$, $V_{DS} = V_{DQ} + V_{DP}$, 脉冲之后 V_{GS} 和 V_{DS} 随即回到初始点 (V_{GQ}, V_{DQ}), 如图 3 所示. 此时对漏上的电流进行扫描取样便得到器件的动态 I - V 特性. 当脉宽小于表面电子陷阱的充放电时间, 外沟道来不及打开, 就会观察到电流崩塌现象. 运用这一方法可以方便地对制作器件的电流崩塌特性进行比较测试.

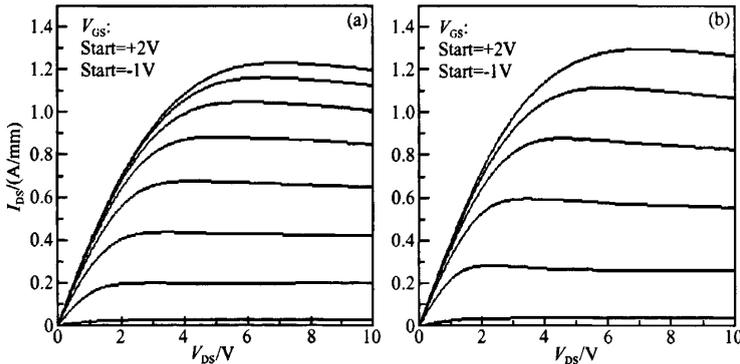


图 2 AlGaIn/GaN HEMT 直流 I - V 特性 (a) 未采用凹槽栅; (b) 采用凹槽栅
Fig. 2 I - V characteristics of AlGaIn/GaN HEMT (a) Non-recessed HEMT; (b) Recessed FP-HEMT

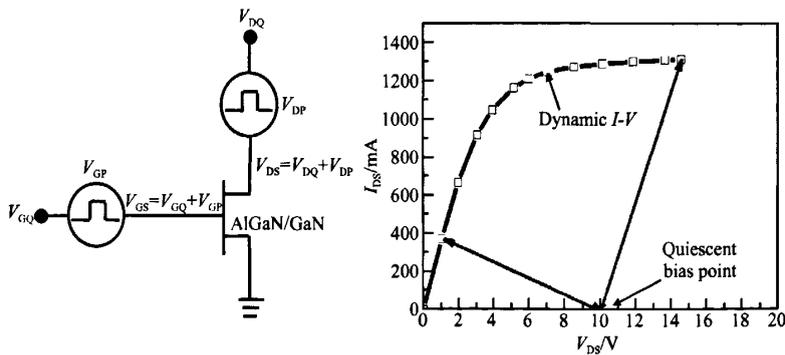


图 3 动态 I - V 测试示意图
Fig. 3 Sketch of dynamic I - V measurements

在 AlGaIn/GaN HEMT 中栅电极下的沟道(内沟道)直接受栅压控制,而栅-漏电极间的沟道(外沟道)则要受到虚栅制约^[1]. 因此,这两部分沟道中的电子气密度及电场分布是各不相同的. 内外沟道交界处的电场可达到 MV/cm 量级,沟道中热电子很容易被激发到高激发态而隧穿到表面态. 虚栅沟道表面俘获电子以后使沟道部分夹断,当栅下沟道打开时,虚栅下沟道不能及时打开,产生电流崩塌.

图 4 比较了 3 种不同结构 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. 途中纵轴为 $I_{max}@V_{DQ}/I_{max}@V_{DQ}=0V$. 结果表明没有采用场板的器件 I_{max} 随漏上偏置电压提高明显持续下降,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 $<3\%$,这是因为引入场板有效降低了器件栅下沟道中靠漏侧的峰值电场强度^[6],这一方面有助于提高器件击穿电压,另一方面将减小沟道中受强电场激发隧穿到器件表面的电子数量,起到抑制电流崩塌的作用. 而在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%,这是因为源漏电压继续增大时,沟道中电场强度也随之增大,沟道中电子进入器件表面态的数量也相应增加,当漏端静态偏置电压超过一临界值时,产生更强的强场电流崩塌, I_{max} 将随着偏置电压的提高而较大幅度下降. 此时凹槽栅的采用,调制了内沟道的电场分布,配合场板结构调制外沟道下电场分布,可以改善器件栅漏之间的电场分布,降低栅下沟道中靠漏侧的电场强度,使这一临界偏置电压值来得更高.

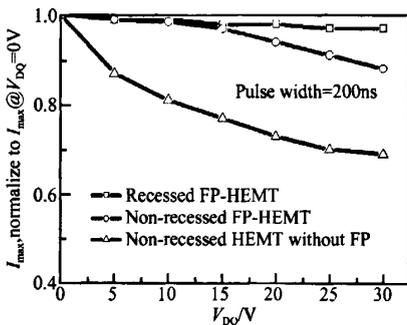


图 4 AlGaIn/GaN HEMT 的归一化 I_{max}

Fig. 4 I_{max} normalize to $I_{max}@V_{DQ} = 0V$ of AlGaIn/GaN HEMT

图 5 所示的是静态工作点的栅偏置取在 $V_{GQ} = -4V$ (器件夹断)时,不同初始漏压下的 $I-V$ 特性对

比图,脉宽选择为 $0.2\mu s$,占空比为 0.04% ,初始漏压分别取为 10, 20 和 30V. 可以观察到 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的提高略有下降,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现象.

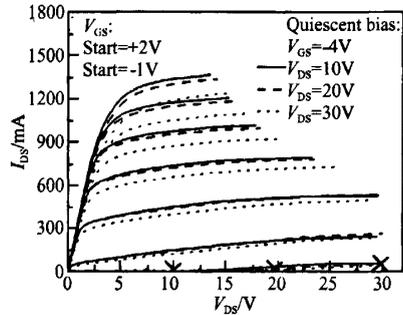


图 5 动态测试 $I-V$ 特性,脉宽 $0.2\mu s$,静态工作点 (V_{GQ}, V_{DQ}) = (-4V, 10V), (-4V, 20V), (-4V, 30V)

Fig. 5 Pulse width: $0.2\mu s$, dynamic $I-V$ characteristics at (V_{GQ}, V_{DQ}) = (-4V, 10V), (-4V, 20V), (-4V, 30V)

图 6 所示的是不同脉宽条件下,采用凹槽栅场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 动态 $I-V$ 特性测试数据,静态工作点选取 $V_{GQ} = -4V, V_{DQ} = 10V$. 我们发现在漏电压较小时,脉宽越小, I_{DS} 也随之越小,这个现象用虚栅的电流崩塌模型可以比较清楚地解释:脉宽越小,虚栅下沟道越不容易打开,电流崩塌现象越显著. 从图中可以看出,此器件电流崩塌效应并不显著. 但是,随着漏电压 V_{DS} 超过某一值时,脉宽越小, I_{DS} 反而越大. 本文认为,这应该是由自热效应 (self-heat) 的影响. 漏电压增大使得器件单位时间产生的热量增大,自热效应逐步增强,而瞬时电压脉宽的增加和漏电压的增大都会使自热效应更加显著,器件电子迁移率随温度升高而降低,也会发生电流崩塌.

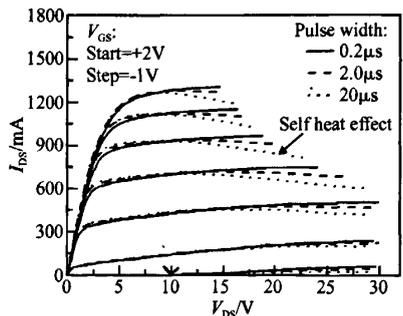


图 6 静态工作点 (V_{GQ}, V_{DQ}) = (-4V, 10V) 时不同脉宽条件下动态 $I-V$ 特性

Fig. 6 Quiescent bias; (V_{GQ}, V_{DQ}) = (-4V, 10V), dynamic $I-V$ characteristics at different pulse widths

3.3 微波特性

测试了 3 种不同结构的 1mm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 微波功率特性,图 7 为频率为 8GHz 时输出功率与输入功率的关系曲线.具有凹槽栅场板结构的器件如前所述较好地抑制了器件的电流崩塌,保证了器件在射频工作时的源漏电流,使得输出功率增长,而其他两种结构的器件由于表现出了较大程度的电流崩塌,器件在射频工作时的电流摆幅被压缩,故表现了不同程度的功率崩塌.当 P_{in} 为 31.94dBm 时,输出功率 40.04dBm,输出功率密度 10.1W/mm,功率增益 8.1dB,功率附加效率为 45%.

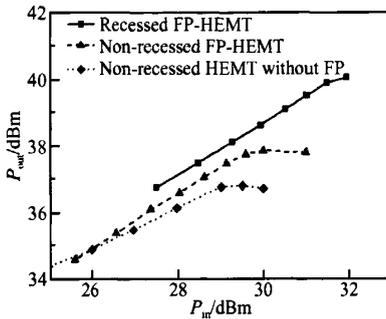


图 7 输出功率与输入功率的关系

Fig. 7 Dependence of output power on input power

4 结论

本文通过对不同结构的 AlGaIn/GaN HEMT

器件静态直流参数、动态直流参数、微波特性的对比测试,验证了凹槽栅工艺结合场板结构,通过对内外沟道电场的分别调制,可以有效地抑制器件的电流崩塌现象,从而提高器件的微波功率特性,采用此技术研制的 1mm 栅宽器件的输出功率 $P_{out} > 10W$.

致谢 本项工作得到李忠辉博士、焦刚高工、钟世昌、董逊、李肖等同志的大力帮助,在此表示诚挚感谢.

参考文献

- [1] Vetry 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] Okamoto Y, Ando Y, Nakayawa T, et al. High-power recessed-gate AlGaIn-GaN HFET with a field-modulating plate. IEEE Tran Electron Devices, 2004, 51(12): 2217
- [5] Binari S C, Roussos J A, Roussos J A. Trapping effects and microwave power performance in AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 456
- [6] Karmalkar S, Shur M S, Simin G, et al. Field-plate engineering for HFETs. IEEE Trans Electron Devices, 2005, 52(12): 2534

Characteristic of the Recessed-Gate AlGaIn/GaN HEMT with a Field Plate

Chen Chen^{1,2,†}, Chen Tangsheng², Ren Chunjiang², and Xue Fangshi²

(1 Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

(2 National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing 210016, China)

Abstract: Three kinds of AlGaIn/GaN HEMTs have been fabricated: (a) non-recessed HEMT without FP HEMT (b) non-recessed FP HEMT, and (c) recessed FP HEMT. Thought contrast the dynamic $I-V$ and microwave measurement to the three devices, we find that the field plate and gate recess can modulate the field in the channel, then suppress the current collapse and enhanced break-down voltage and improve the output power. A 1mm gate width device with this structure exhibited a saturated output power of more than 10W.

Key words: AlGaIn/GaN; HEMT; field modulating plate; gate recess; dynamic measurement
EEACC: 2560S

Article ID: 0253-4177(2007)S0-0407-04

† Corresponding author. Email: chenc55@sina.com

Received 16 November 2006