

钝化与场板结构对 AlGaIn/GaN HEMT 电流崩塌的影响^{*}

马香柏[†] 张进城 郭亮良 冯 倩 郝 跃

(西安电子科技大学微电子学院 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

摘要: 由于 AlGaIn/GaN HEMT 的几何结构以及很强的极化效应, 栅漏区域的电场很大, 以至于电子可以从栅隧穿到 AlGaIn 表面. 隧穿电子在表面累积, 导致栅下耗尽区的电子向漏端延伸, 从而引起漏极电流的下降. 文中采用应力测试方法, 研究了未钝化、钝化以及场板三种结构的 AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌程度. 实验结果表明, 钝化隔断了电子从栅隧穿到 AlGaIn 表面的通道, 场板结构能够有效降低栅边缘电场, 均减少了电子从栅隧穿到表面陷阱的几率, 从而使虚栅的作用减弱, 有效地抑制了电流崩塌效应.

关键词: 电流崩塌; 钝化; 场板结构

PACC: 7280E; 7360L; 7220J

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)01-0073-05

1 引言

AlGaIn/GaN 异质结构有很大的导带偏移, 而且在异质界面附近产生很强的自发极化和压电极化, 感生出很强的界面电荷和电场, 积聚起高密度的二维电子气. 这种二维电子气可以由不掺杂势垒层中的电子转移来产生, 这种分离减少了母体对电子的库仑作用, 消除了电离散射中心的影响, 提高了电子迁移率. GaN 材料的这些特点决定了 AlGaIn/GaN HEMT 具有优异的微波功率特性, 目前 AlGaIn/GaN HEMT 的最大输出漏电流达到 2.1A/mm^[1], 器件最大跨导达到 525mS/mm, 击穿电压在 600V 以上^[2], SiC 衬底上, 4GHz 微波功率达到了 136W^[3].

虽然 AlGaIn/GaN HEMT 表现出了良好的微波功率特性, 但是电流崩塌效应仍然是限制其广泛应用的主要困难. 大量文献报道, 对器件施加大的栅漏电压, 器件直流特性明显退化, 出现电流崩塌现象^[4~6]. 在大的栅漏电压下, 栅漏之间产生大电场, 电子从栅隧穿到 AlGaIn 表面, 被栅漏之间的表面态俘获, 使耗尽区向漏端延伸, 形成虚栅, 从而减少了沟道的 2DEG, 导致器件出现电流崩塌^[4]. 最近, 利用 FP(field-plated)场板结构^[5]制成的栅长 1 μ m、源漏间距 4.5 μ m 的 HEMT 器件, 在 2GHz 下的微

波输出功率为 10W/mm. FP HEMT 器件微波功率特性的改善, 主要是由于增加了击穿电压以及减少了栅边缘的峰值电场^[7], 场板结构对电流崩塌的影响有待研究.

本文研究了钝化以及场板结构对电流崩塌的改善, 通过对未钝化、钝化以及场板这三种不同结构的器件施加直流应力, 比较它们的电流退化程度, 说明钝化以及场板结构能够有效地减少栅边缘电场, 减少了注入到表面态的泄漏电流, 从而有效地抑制了电流崩塌. 并采用 ATLAS-SILVACO 模拟未钝化以及场板结构的栅极边缘电场分布图, 说明了大的栅漏电场导致填充表面态的电子数增加仍然是电流崩塌的重要原因.

2 器件结构与工艺

实验中所采用的 AlGaIn/GaN 异质结材料样品是利用 MOCVD 制备的. 衬底为 (0001) 面单面抛光蓝宝石. 先在 520 $^{\circ}$ C 下生长厚度约为 30nm 的 GaN 成核层, 接着在高温下依次生长厚度约为 1 μ m 的 GaN 缓冲层, 8nm 厚的未掺杂 AlGaIn 层以及 16nm 厚的 Si 掺杂 AlGaIn 层, 其中 Si 掺杂浓度为 $1.0 \times 10^{18} \sim 2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 测量得到的 AlGaIn 层的 Al 组分为 27%, Hall 效应测量显示室温下该材料的方块电阻为 312 Ω/\square , 电子迁移率为 1234 $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,

^{*} 国家重大基础研究发展计划 (批准号: 2002CB3119, 513270407), 国防科技重点实验室基金 (批准号: 51432030204DZ0101, 51433040105DZ0102) 资助项目

[†] 通信作者. Email: coolmaer@163.com

2006-07-25 收到, 2006-08-04 定稿

电子面密度为 $1.62 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$. 欧姆接触为 Ti/Al/Ni/Au (20nm/120nm/55nm/45nm), 在 N_2 气氛下进行快速热退火 (二次退火, 830°C , 30s; 200°C , 10s), 肖特基接触金属为 Ni/Au (20nm/200nm) 作栅, 这样就制成了实验所需的未钝化器件. 在常规 HEMT 制作测试之后, 利用电子束蒸发一层 SiO_2 (150nm) 作钝化层, 作成了实验所需的钝化器件. 再在其上蒸发金属 Ni/Au (20nm/200nm) 作场板, 这就制成了实验所需的场板器件. 实验中就是对同一个衬底, 三个不同的工艺阶段的器件进行测试, 得到未钝化、钝化以及场板结构的电流崩塌特性.

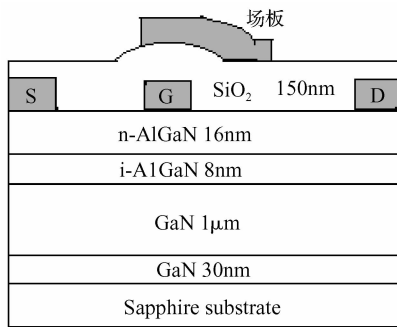


图 1 场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT
Fig. 1 Field-plate AlGaIn/GaN HEMT

3 结果与讨论

测试仪器为 HP4155-6 半导体参数分析仪和 Signatone S1160 探针台. 为了屏蔽环境光线的影响, 测试中探针台均置于屏蔽暗箱中. 施加直流应力前器件的输入输出特性如图 2 所示. 施加直流偏置应力过程中固定漏源电压为 15V, 栅源电压为 -10V , 应力时间为 2min. 足够低的栅电压使沟道处于耗尽状态, 避免了自热效应的影响, 同时也消除了热电子的产生. 同时施加足够大的源漏电压是为了在栅漏间出现强电场, 使更多的电子从栅隧穿到表面态. 为了更清楚地比较器件直流特性退化程度, 并排除扫描过程中栅电压对直流特性的影响, 只选取栅压为 0V 的单一曲线进行测试.

施加应力前后器件的 I - V 特性比较见图 3. 没有钝化以及场板的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 最大饱和漏电流从 643.68 下降到 572.56mA/mm, 下降了 11.0%; 做了 SiO_2 的器件, 器件饱和电流从 451.58 下降到 421.8mA/mm, 下降了 6.60%; 做了场板的器件, 器件饱和电流从 719.75 下降到 706.68mA/mm, 仅仅下降了 1.81%. 实验结果表明, 场板结构能够有效抑制电流崩塌.

把漏压固定在 15V, 栅上加一个 $-10 \sim 0\text{V}$ 的

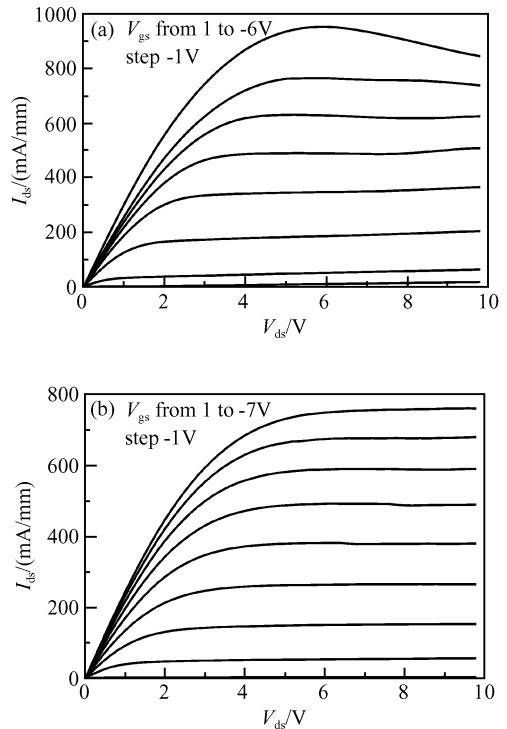


图 2 应力前的 AlGaIn/GaN HEMT 直流特性 (a) 做场板前; (b) 做场板后
Fig. 2 Output characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs before stress (a) Without field-plate; (b) With field-plate

脉冲应力, 脉冲脉宽为 100ms, 周期为 200ms, 应力时间为 150s. 实验结果如图 4 所示, 可以看到明显的漏电流随时间变化的瞬态. 由于栅压是 0V, 电流不大, 而且施加的是脉冲信号, 基本上自热效应的影响很小. 所以我们认为电流随时间逐渐崩塌和应力偏置有关系. 从图 4 可以看出, 在 $t = 40, 100$ 和 150s 时, 未钝化器件的电流崩塌程度分别为 14.69%, 15.27% 和 15.40%; SiO_2 钝化后的器件, 电流崩塌程度分别为 9.63%, 11.7% 和 12.61%; 做了场板以后的器件, 电流崩塌程度只有 4.75%, 5.81% 和 6.05%. 在相同的时间, 比如 40s, 未钝化器件的崩塌程度 14.69% 大于钝化器件的崩塌程度 9.63%, 更大于场板结构的崩塌程度 4.75%, 这说明未钝化器件的电流崩塌最快, 也最明显, 而场板结构可以有效改善电流崩塌效应.

实验还发现, 未钝化以前, 在漏压为 15V, 栅压为 -10V 情况下, 栅极泄漏电流很大, 达到了 3.24mA/mm; 钝化以后, 在同样的栅漏电压下, 栅极泄漏电流减少到 0.72mA/mm; 而场板结构的器件, 栅极泄漏电流只有 $8.8 \times 10^{-4} \text{ mA/mm}$, 如图 5 所示. 可见, 钝化结构减少了 AlGaIn/GaN HEMT 器件的栅极泄漏电流, 而场板结构则把泄漏电流降至更小.

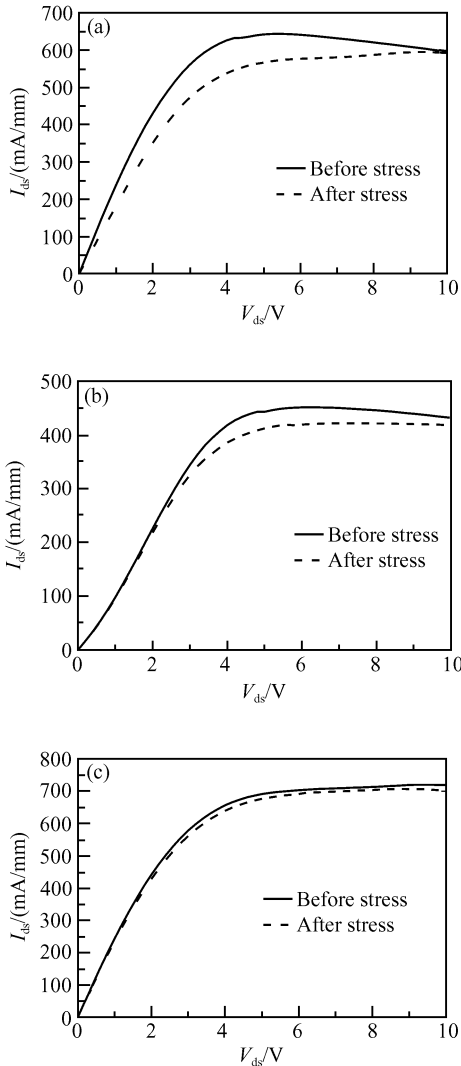


图 3 AlGaIn/GaN HEMTs 应力前后的器件特性比较 (a) 未钝化; (b) SiO₂ 钝化; (c) 场板结构
 Fig. 3 Output characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs before and after stress (a) Un-passivation; (b) SiO₂ passivation; (c) With field-plate

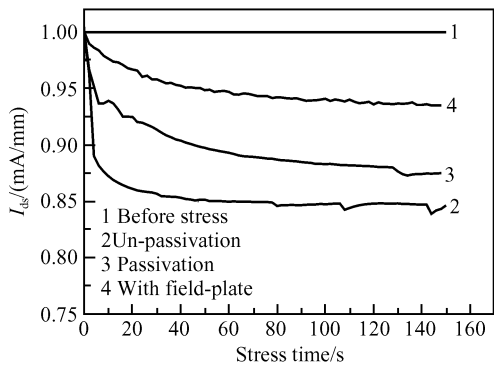


图 4 源漏峰值电流随应力时间的变化
 Fig. 4 Variation of drain peak current versus stress time

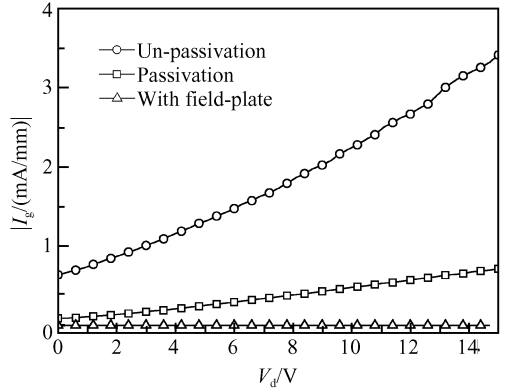


图 5 未钝化、钝化、场板三种结构栅极泄漏电流比较 测试条件 $V_g = -10V$, V_d 从 0 扫描到 15V.
 Fig. 5 Comparison of gate leakage currents for different AlGaIn/GaN HEMTs with un-passivation, passivation and field-plate structure Measurement conditions: $V_g = -10V$, $V_d = 0 \sim 15V$

综合以上实验结果,可以发现栅极泄漏电流越大,电流崩塌效应越明显.深入分析可发现,在 AlGaIn 材料生长过程中,由于自发极化以及压电极化,会在 AlGaIn 层建立一个内建电场,方向指向 AlGaIn 表面.当 AlGaIn 层生长到一定厚度后,内建电场会达到 $10^6 V/cm$ 的量级,这个量级的电场使共价键的电子离化,离化的电子在内建电场的作用下,漂移到 AlGaIn/GaN 界面,形成 2DEG,在表面则会留下大量的空穴,表现为电子陷阱^[8].在器件关断的情况下,源极流经沟道的电流被关断,不会有沟道电子隧穿到表面态.但是由于栅漏电场较大,会有比较大的泄漏电流进入 AlGaIn 层.这些从栅极注入的电子将会填充栅漏之间靠近栅区域的表面态,引起虚栅效应,导致电流崩塌^[9].在 SiO₂ 钝化后,隔断了电子从栅隧穿到 AlGaIn 表面态的通道,同时减少了表面态密度^[10],从而减少了填充表面态的电子数.但由于 SiO₂ 钝化层是用电子束蒸发的方式获得,其致密性不好,所以并不能完全隔断电子隧穿的通道.在漏压为 15V,栅压为 -10V 的栅漏电压下,栅极泄漏电流为 0.72mA/mm,这样在栅漏之间大的电场应力之后,仍然会有电流崩塌现象的产生,如图 3(b)所示.

为了进一步研究栅边缘电场对电流崩塌的影响,我们在 SiO₂ 钝化层上加了一层场板.场板结构主要是为了减少靠近漏端栅极的边缘电场.图 6 是场板结构减少 AlGaIn/GaN HEMT 栅边缘电场示意图,栅边缘的大部分电场被场板分担,有效地减少了栅边缘电场,减少了栅极泄漏电流.实验也证明了场板下的栅极泄漏电流大大减小,如图 5 所示,在漏压为 15V,栅压为 -10V 的情况下,栅极泄漏电流只有 $8.8 \times 10^{-4} mA/mm$,这就减少了填充表面态的

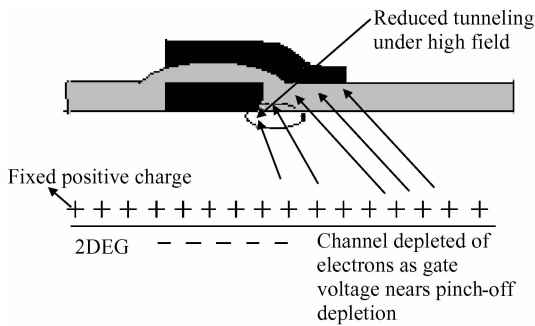


图 6 场板结构减少 AlGaIn/GaN HEMT 栅边缘电场示意图
Fig. 6 Reduction of gate edge field in AlGaIn/GaN HEMTs due to field-plate

电子, 电流崩塌效应减弱. 实验利用 ATLAS 软件对钝化、场板两种结构的栅边缘电场分布进行了模拟, 仿真时源漏电压为 15V, 栅源电压为 -10V 其结果如图 7 所示.

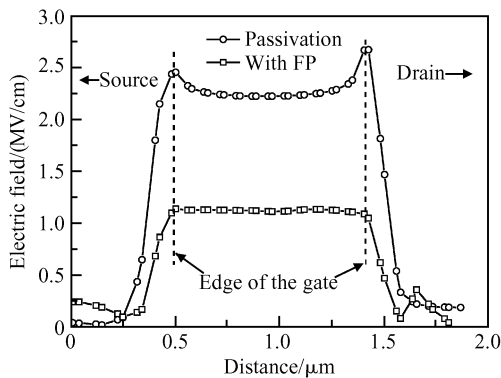


图 7 钝化以及场板结构的 AlGaIn/GaN HEMT 栅边缘电场分布
Fig. 7 Gate edge field distributions of AlGaIn/GaN HEMTs with passivation and with field-plate

模拟结果发现, 利用场板结构可以减少栅极泄漏现象. SiO_2 钝化的器件, 栅边缘电场为 2.69×10^6 V/cm; 做了场板以后, 栅边缘电场只有 1.09×10^6 V/cm, 是钝化器件的 40%, 可见场板结构明显减少了栅极边缘电场, 从而减少了从栅极隧穿到表面态的泄漏电流. 在 GaAs MESFETs 以及 HEMTs, 还有 AlGaIn/GaN HEMTs 中, 都可以运用场板结构. 场板结构使漏极可以加更大的电压, 在 GaAs MESFETs 中, 漏压可以加到 30~40V, 在 AlGaIn/GaN HEMTs 中, 漏压可以加到 100V 以上, 这样就提高了 RF 输出功率.

4 结论

本文对未钝化、钝化以及带有场板的器件施加

应力, 观察相同应力下的电流崩塌现象, 发现在 $V_{gs} = -10\text{V}$, $V_{ds} = 15\text{V}$, 时间为 150s 的应力下, 未钝化的 AlGaIn/GaN HEMT 电流下降了 11%, 而做了钝化以及场板的器件电流崩塌程度分别只有 6.60% 和 1.81%. 对器件的栅施加一个 -10~0V, 周期为 200ms, 脉宽为 100ms 的脉冲信号, 发现未做钝化的 AlGaIn/GaN HEMT 器件崩塌现象非常明显, 在前 40s 就崩塌了 14.69%, 而做了钝化的器件在前 40s 下降了 9.63%, 做了场板的器件只下降了 4.75%, 这说明钝化和场板结构能够有效抑制电流崩塌. 分析发现, SiO_2 钝化后, 隔断了电子从栅隧穿到 AlGaIn 表面的通道, 从而减少了电子从栅隧穿到电子陷阱的几率. 通过 ATLAS-SILVACO 模拟, 发现场板结构能够有效降低栅边缘电场, 减少电子从栅隧穿到表面陷阱的几率, 从而使虚栅的作用减弱, 有效地抑制了电流崩塌效应.

参考文献

- [1] Chini A, Coffie R, Meneghesso G, et al. A 2.1A/mm current density AlGaIn/GaN HEMT. *Electron Lett*, 2003, 39(7):625
- [2] Ssito W, Takada Y, Kuraguchi M, et al. High breakdown voltage AlGaIn-GaN power-HEMT design and high current density switching behavior. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(12):2528
- [3] Kikkawa T, Maniwa T, Hayashi H. An over 200W output power GaN HEMT push-pull amplifier with high reliability. *IEEE MTT-S Digest*, 2004:1347
- [4] Vertiatchikh A V, Eastman L F. Effect of the surface and barrier defects on the AlGaIn/GaN HEMT low-frequency noise performance. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 24(9):535
- [5] Tan W S, Houston P A, Hill G, et al. Electrical characteristics of AlGaIn/GaN metal-insulator semiconductor heterostructure field-effect transistors on sapphire substrates. *J Electron Mater*, 2003, 32(5):350
- [6] Vetry R, Zhang N, Keller S, et al. The impact of surface states on the DC and RF characteristics of AlGaIn/GaN HFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3):560
- [7] Saito W, Kuraguchi M, Takada Y, et al. Influence of surface defect charge at AlGaIn-GaN-HEMT upon Schottky gate leakage current and breakdown voltage. *IEEE Electron Device Lett*, 2005, 52(2):159
- [8] Trew R J, Bilbro G L, Kuang W, et al. Microwave AlGaIn/GaN HFETs. *IEEE Microw Magazine*, 2005, 6(1):56
- [9] Hasegawa H, Inagaki T, Ootomo S, et al. Mechanisms of current collapse and gate leakage currents in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. *Microelectronics and Nanometer Structures*, 2003, 21(4):1844
- [10] Tan W S, Houston P A. Understanding surface and bulk leakage mechanisms in AlGaIn/GaN HFETs. 2nd EMRS DTC Technical Conference, 2005:27

Effects of Passivation and FP Structure on Current Collapse in an AlGaIn/GaN HEMT*

Ma Xiangbai[†], Zhang Jincheng, Guo Liangliang, Feng Qian, and Hao Yue

(*Microelectronics School, Xidian University, Key Laboratory of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices of the Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: Due to the geometry and polarization of AlGaIn/GaN HEMTs, the electric field in the gate-drain region is very high, and is sufficient to produce a tunneling current from the gate metal to the surface of the AlGaIn barrier layer. The electrons that tunnel to the semiconductor surface can accumulate on the surface near the gate, resulting in the extension of the depletion region and current collapse. Bias stress measurements were made to determine an AlGaIn/GaN HEMT's current collapse. Surface passivation prevents the electrons from getting trapped at the surface, and a field plate suppresses the electric field at the gate edge, thereby reducing the gate leakage by a significant factor. Thus the current collapse can be effectively suppressed by surface passivation and the field-plate structure.

Key words: current collapse; passivation; field-plate

PACC: 7280E; 360L; 7220J

Article ID: 0253-4177(2007)01-0073-05

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Nos. 2002CB3119, 513270407), and the National Defense Scientific and Technical Key Laboratory Foundation of China (Nos. 51432030204DZ0101, 51433040105DZ0102)

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

Received 25 July 2006, revised manuscript received 4 August 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics