

# 钝化前表面预处理对 AlGaIn/GaN HEMTs 性能的影响\*

李诚瞻<sup>†</sup> 刘 丹 郑英奎 刘新宇 刘 键 魏 珂 和致经

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:** 提出一种新的钝化技术——采用盐酸和氢氟酸混合预处理溶液(HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20)对 AlGaIn/GaN HEMTs 进行表面预处理后再淀积 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 钝化,研究了新型钝化技术对 AlGaIn/GaN HEMTs 性能的影响并分析其机理.与用常规方法钝化的器件相比,经过表面预处理再钝化,成功地抑制了 AlGaIn/GaN HEMTs 肖特基特性的恶化,有效地增强抑制电流崩塌效应的能力,将 GaN 基 HEMTs 的输出功率密度提高到 5.2W/mm,并展现良好的电学可靠性.通过 X 射线光电子谱(XPS)检测预处理前后的 AlGaIn 表面,观察到经过预处理后的 AlGaIn 表面氧元素的含量大幅度下降.表面氧元素的含量下降,能有效地降低表面态密度和表面电荷陷阱密度,被认为是提高 AlGaIn/GaN HEMTs 性能的主要原因.

**关键词:** AlGaIn/GaN HEMTs; 钝化; 表面预处理; 初始氧化层;

**EEACC:** 2570

**中图分类号:** TN325+.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2008)02-0329-05

## 1 引言

AlGaIn/GaN HEMTs 在高温、高压、高频大功率方面的潜在优势,使其受到广泛关注,并取得巨大进展.目前,文献报道基于 SiC 衬底的 AlGaIn/GaN HEMTs,在 9.5GHz 工作条件下能实现 81.3W 的输出功率,功率附加效率(PAE)能达到 34%<sup>[1]</sup>.

虽然 AlGaIn/GaN HEMTs 在高频、大功率方面取得了可喜的成就,但电流崩塌效应依然是 AlGaIn/GaN HEMTs 发展所面临的主要问题<sup>[2]</sup>.钝化技术<sup>[3]</sup>和场板结构<sup>[4]</sup>是抑制 AlGaIn/GaN HEMTs 电流崩塌效应最重要的工艺方法.钝化技术既是抑制电流崩塌效应的重要方法,又是场板结构优化的基础,因此钝化质量的优劣,对 AlGaIn/GaN HEMTs 器件性能的优劣有着直接的影响,因而优化钝化技术显得尤为重要.

Tilak 等人<sup>[5]</sup>改变 PECVD 淀积 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 条件和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 厚度,优化钝化方法,改善钝化技术; Gillespie 等人<sup>[6]</sup>采用 Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 作为钝化介质,优化钝化材料.通过改善钝化条件或优化钝化介质材料的方法,能在一定程度上有效地抑制电流崩塌效应,提高器件性能. Edwards 等人<sup>[3]</sup>提出表面预处理的观念,在钝化前将 GaN 基 HEMTs 暴露于低功率 NH<sub>3</sub> 等离子体中,对 AlGaIn 表面进行预处理,能有效地抑制电流崩塌效应,提高 AlGaIn/GaN HEMTs 的电学可靠性.

但是 AlGaIn 表面存在的初始氧化层以及 AlGaIn 和钝化介质之间界面层的固有缺陷,始终没有得到有效地改善.这严重限制了 AlGaIn/GaN HEMTs 的输出功率,影响器件的长期稳定性和可靠性. Liu 等人<sup>[7]</sup>在蒸发 Pt/Au 肖特基金属之前采用 HF 和 HCl 混合溶液处理

AlGaIn 表面,有效地消除了表面初始氧化层,提高了二极管的肖特基特性.本文在钝化前利用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 混合溶液对裸露的 AlGaIn 进行表面预处理,优化 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 钝化质量,能有效地抑制电流崩塌效应,提高 AlGaIn/GaN HEMTs 的退化特性,增强器件的直流性能和功率性能.利用 X 射线光电子谱(XPS)测试表面预处理前后 AlGaIn 表面各元素的变化情况,分析 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液表面预处理提高器件性能的根本原因.

## 2 实验

本实验采用中国科学院半导体研究所提供的 AlGaIn/GaN 外延材料,外延材料采用金属有机物化学气相淀积技术(MOCVD)制备,衬底为 50mm (0001)蓝宝石.材料结构由下至上分别为 3.5μm 的 GaN 缓冲层,110nm 的高迁移率 GaN 层,23nm 的非掺杂 AlGaIn 层,其中 Al 组分为 20%.室温下霍尔测试得出,二维电子气的浓度为 1.6×10<sup>13</sup>/cm<sup>2</sup>,迁移率为 1320cm<sup>2</sup>/(V·s).

器件结构如图 1 所示,使用 ICP 干法刻蚀实现器件隔离,测试岛间电流只有 10<sup>-9</sup>A 量级,显示了良好的隔离效果;欧姆接触采用 Ti/Al/Ti/Au,在 850℃ 30s 条件下 N<sub>2</sub> 氛围进行快速热退火(RTA),实现约 10<sup>-6</sup>Ω·cm<sup>2</sup>的低接触电阻率,源漏间距为 5μm;栅金属采用 Ni/Au,栅长 0.8μm,栅宽 120μm.

为了直观地比较钝化前采用的 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液进行表面预处理对 AlGaIn/GaN HEMTs 性能的影响,将做完栅的晶圆裂成两半.其中半个晶圆经过清洗后直接淀积 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>,为样品 A;另外半个晶圆在钝化之前,采用预处理溶液对裸露 AlGaIn 进行

\* 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基金(批准号:KGCX2-SW-107)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: lichzhan@163.com

2007-07-24 收到,2007-08-28 定稿

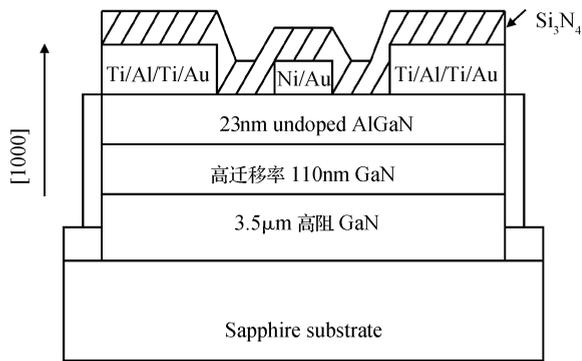


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 横截面示意图

Fig. 1 Schematic cross section of AlGaIn/GaN HEMT

表面预处理,再淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  进行钝化,为样品 B. 表面预处理过程包括采用  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  溶液对 AlGaIn 表面进行预处理 15~20s,再利用异丙醇超声清洗 AlGaIn 表面 60s. 样品 A 和样品 B 采用等离子增强气相化学沉积 (PECVD) 的方法,以相同的条件淀积生长 200nm 优化的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化层进行表面钝化,通过刻孔技术打开金属接触部分,引出栅、源、漏的测试点.

### 3 结果与讨论

实验利用 HP4155A 半导体参数分析仪测试 AlGaIn/GaN HEMTs 的直流特性. 图 2(a) 示出未钝化、常

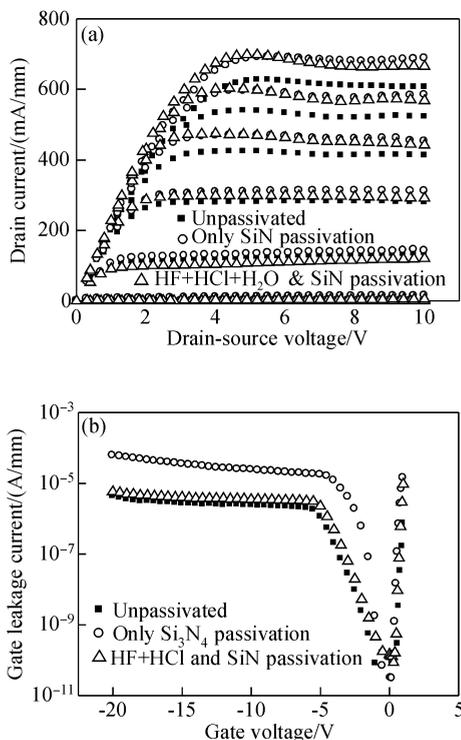


图 2 未钝化、常规方法钝化和  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  溶液表面预处理后钝化 AlGaIn/GaN HEMTs 的输出特性曲线 (a) 和肖特基特性曲线 (b)

Fig. 2 Output characteristics (a) and Schottky characteristics (b) of unpassivated AlGaIn/GaN HEMTs, passivated devices with  $\text{Si}_3\text{N}_4$  only and with both  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  pre-treated and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  deposited

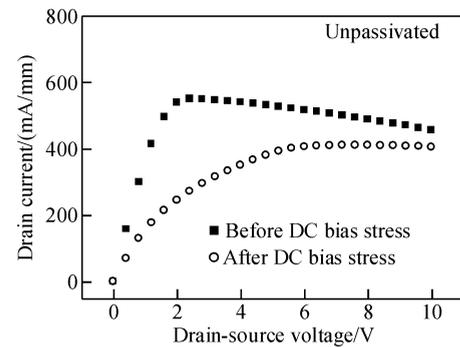


图 3 直流偏置应力条件下, AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应

Fig. 3 Current collapse effect of unpassivated AlGaIn/GaN HEMTs induced by DC bias stress

规方法钝化和经过表面预处理后钝化 AlGaIn/GaN HEMTs 的输出特性曲线. 钝化后器件的输出电流出现一定程度的增加,采用不同方式钝化的 GaN 基 HEMTs 输出电流都增大到  $690\text{mA}/\text{mm}$ , 膝点电压减小为  $3.2\text{V}$ . 由此可见,采用  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  溶液对 AlGaIn 表面进行表面预处理对器件的输出特性并没有明显的影响. 图 2(b) 示出上述 3 种结构的肖特基特性曲线. 采用常规方法钝化,  $V_g = -20\text{V}$  时相应的栅反向泄漏电流从  $4.5\mu\text{A}/\text{mm}$  增大到  $82\mu\text{A}/\text{mm}$ , 增大约 20 倍,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化使 AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基栅泄漏电流有较大幅度增加; 利用  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  溶液进行表面预处理后钝化,  $V_g = 20\text{V}$  时相应的栅电流只有  $6.7\mu\text{A}/\text{mm}$ , 比钝化前的器件栅电流略有增加. 由此可见,经过表面预处理,可在很大程度上抑制栅反向泄漏电流增加.

采用文献 [8] 所述的方法测试 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应. 施加直流偏置应力过程中,固定源漏电压  $V_{ds} = 30\text{V}$ , 栅源电压  $V_{gs} = -8\text{V}$ , 应力时间  $t = 10\text{min}$ . 图 3 示出直流偏置应力前后,未钝化的 AlGaIn/GaN HEMTs 在  $V_g = 0\text{V}$  条件下的输出特性. 在直流偏置应力作用下,器件的输出电流大幅度下降,膝点电压明显增大,电流崩塌程度高达 40%, 出现严重的电流崩塌现象. 电流崩塌现象可解释为在直流偏置应力强电场作用下,形成热电子,产生或激活 AlGaIn 表面或体内的缺陷,缺陷俘获电荷引起电流崩塌现象<sup>[2,9]</sup>.

图 4(a) 示出钝化后的 AlGaIn/GaN HEMTs 在直流偏置应力作用下的电流崩塌特性.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化后,在同样的直流偏置应力条件下,电流崩塌程度减小到 7.8%, 实验表明,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化能在一定程度上缓解电流崩塌效应. 但是纯粹采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  进行钝化,对电流崩塌效应的抑制能力有限,加长直流偏置应力作用时间, AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应程度有增大的趋势. 为了进一步增强对 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应的抑制能力,利用  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  预处理溶液对 AlGaIn 进行表面预处理,再淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  进行钝化. 实验发现,器件并没有观察到明显的电流崩塌现象. 即使增加直流偏置应力到 1h 以上,电流崩塌程度也只有不到 2%, 如图 4(b) 所示.

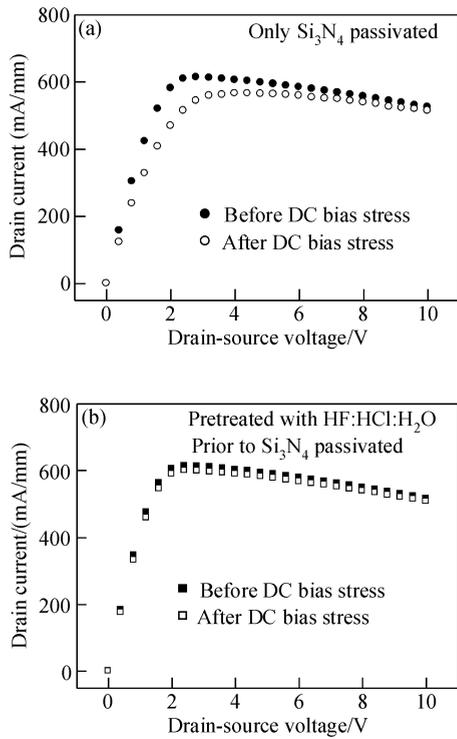


图 4 钝化后 AlGaIn/GaN HEMTs 的电流崩塌效应 (a)只采用 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 钝化的常规方法; (b)采用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液预处理后钝化 Fig. 4 Current collapse effect of passivated AlGaIn/GaN HEMTs (a) Passivated with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> only; (b) Both pretreated with HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 and passivated with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

利用 Load-Pull 功率测试系统对栅宽  $W_g = 120\mu\text{m}$  的在片 AlGaIn/GaN HEMTs 进行功率性能测试, 测试的工作频率为 5.4GHz. 图 5 示出有、无利用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液进行表面预处理的 AlGaIn/GaN HEMTs 表面钝化后的功率特性曲线. 在输入功率  $P_{in} = 6\text{dBm}$  时, 二者的功率增益 (gain) 分别为 9.5 和 10dB, 并没有明显的差别. 随着输入功率的增加, 没有经过表面预处理的钝化 AlGaIn/GaN HEMTs 功率

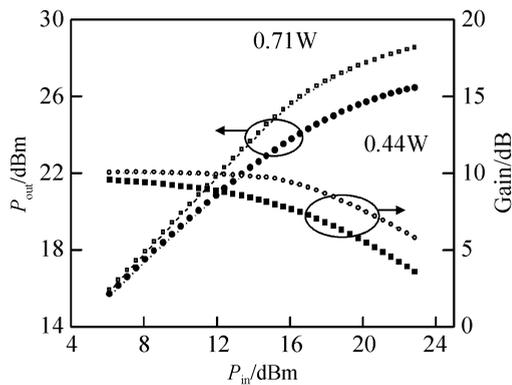


图 5 5.4GHz 频率条件下, 常规方法钝化 (实心点线) 和 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液表面预处理后钝化 (空心点线) 的 60 $\mu\text{m}$  栅宽 AlGaIn/GaN HEMTs 的功率特性 Fig. 5 Power sweep at 5.4GHz for 60 $\mu\text{m}$ -gate-wide passivated devices with only Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (solid dot) and with both HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 and passivated with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (hollow dot)

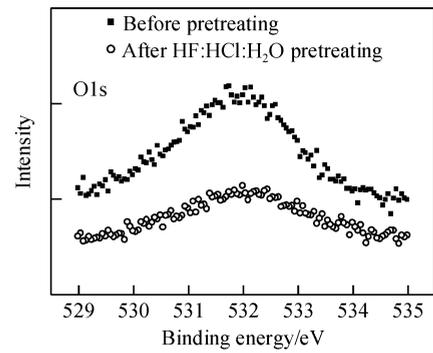


图 6 采用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 液进行表面预处理前后 O1s 的 XPS 光谱图 Fig. 6 XPS of O1s spectra for samples before and after HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 pretreating

增益迅速减小, 当  $P_{in} = 18.5\text{dBm}$  时, 功率增益下降了 3dB, 减小到 6.5dB; 经过表面预处理后钝化的 AlGaIn/GaN HEMTs 保持较好的线性度, 输入功率增大到  $P_{in} = 21\text{dBm}$  时, 功率增益才出现 3dB 压缩, 增益减小为 7dB. 在功率增益 3dB 压缩点, 对应的输出功率密度分别为 2.7 和 5.2W/mm. 继续增大输入功率, 得到二者的最大输出功率密度分别为 3.6 和 5.9W/mm. 实验表明, 利用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液进行表面预处理再钝化有利于增强 AlGaIn/GaN HEMTs 的线性度, 提高器件的功率性能. 长时间测试经过 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 预处理溶液进行表面预处理的钝化 AlGaIn/GaN HEMTs, 可见器件的功率性能只有微弱退化, 甚至在系统误差范围之内.

为了进一步分析 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液进行表面预处理后钝化增强 AlGaIn/GaN HEMTs 性能的根本原因, 利用 X 射线光电子谱 (XPS) 测试表面预处理前后 AlGaIn 表面各元素的变化情况. 在光电子谱图中观察到, 表面预处理后的 Al2p, Ga3d, N1s 等信号峰强度略微有所增强, 但是 AlGaIn 表面的 O1s 信号峰强度明显减弱. 图 6 示出利用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 预处理溶液进行表面预处理前后, O1s 的 X 射线光电子谱图. 经过表面预处理后, 只有微弱的 O 元素信号. 以稳定的 Ga3d 含量作为参考, 计算 AlGaIn 表面 O 元素的变化情况. 表面处理前 O/Ga3d 的比值约为 0.26, 有较高的 O 含量; 利用溶液对 AlGaIn 表面进行处理后, O/Ga3d 的比值减小到约为 0.094, 表面 O 元素含量明显减小. 结果表明, 经过 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液预处理, AlGaIn 表面 O 元素含量大幅度降低, 说明 HF:HCl:H<sub>2</sub>O=1:4:20 溶液能与 AlGaIn 表面初始的 GaO<sub>2</sub> 等氧化物发生反应, 去除 AlGaIn 表面初始氧化层, 致使清洁的 AlGaIn 表面裸露出来.

如前所述, 预处理后钝化的器件与直接钝化的器件输出电流相差无几, 采用 HF:HCl:H<sub>2</sub>O 溶液对 AlGaIn 表面进行表面预处理对器件的输出特性并没有明显的影响, 可能是因为表面初始氧化层对 AlGaIn/GaN HEMTs 的直流输出特性并没有明显的影响. 经过表面

预处理再进行钝化, 只比钝化前的器件栅电流略有增加, 表面预处理能在很大程度上抑制栅反向泄漏电流增加, 可解释为表面预处理有效地去除了 AlGaIn 表面初始氧化层, 特别是栅金属边缘处的氧化层, 能有效减小肖特基反向泄漏电流的栅边缘泄漏电流和 AlGaIn 及介质界面泄漏电流.

通过钝化后肖特基二极管  $C-V$  测试表明, 经过  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  预处理溶液进行表面预处理后钝化的样品, 在 AlGaIn 和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  之间有较低的界面电荷量. 由此表明, 经过预处理的 AlGaIn/GaN HEMTs 能有效地降低表面电荷陷阱密度<sup>[9]</sup>. 这可解释为表面预处理去除了表面初始氧化层, 降低了表面氧元素含量, 有效地减少了表面氧杂质形成的杂质缺陷, 同时有利于降低由于表面氧化物引起的表面态密度, 减小 AlGaIn 表面电荷陷阱密度, 提高 AlGaIn/GaN 异质结构的电学特性<sup>[10,11]</sup>.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化进一步抑制了 AlGaIn 和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  界面电荷陷阱密度的活性, 有利于减小栅漏之间 AlGaIn 和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  之间的界面电荷量, 防止虚栅的形成<sup>[12]</sup>. 有效地增强抑制 AlGaIn/GaN HEMTs 电流崩塌效应能力, 提高其电学可靠性.

## 4 结论

采用  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  预处理溶液对 AlGaIn 进行表面预处理, 再淀积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化, 对于改善 AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基特性有显著效果, 能有效地增强抑制电流崩塌效应的能力, 经过长时间直流偏置应力作用, 电流崩塌程度不到 2%. 与常规钝化方法相比, 经过表面预处理再钝化的 AlGaIn/GaN HEMTs 功率特性得到明显提高, 在功率增益 3dB 压缩点, 二者的输出功率密度分别为 2.7 和 5.2 W/mm. 利用 XPS 检测利用  $\text{HF}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:4:20$  溶液进行表面预处理的 AlGaIn 表面状态, 观察到通过表面预处理的 AlGaIn 表面 O 含量显著下降, AlGaIn 表面初始氧化层得到有效的去除, 导致表面态密度和表面电荷陷阱密度减小. 经过  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化, 进一步抑制 AlGaIn 和  $\text{Si}_3\text{N}_4$  界

面电荷陷阱密度的活性, 防止虚栅形成, 被认为是抑制 AlGaIn/GaN HEMTs 电流崩塌效应, 提高器件电学可靠性的根本原因.

## 参考文献

- [1] Takagi K, Masuda K, Kashiwabara Y, et al. X-band AlGaIn/GaN HEMT with over 80W output power. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2006; 265
- [2] Mittereder J A, Binari S C, Klein P B, et al. Current collapse induced in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors by bias stress. Appl Phys Lett, 2003, 83(8): 1650
- [3] Edwards A P, Mittereder J A, Binari S C, et al. Improved reliability of AlGaIn-GaN HEMTs using an  $\text{NH}_3$  plasma treatment prior to  $\text{SiN}$  passivation. IEEE Electron Device Lett, 2005, 26(4): 225
- [4] Adivarahan V, Yang J, Koudymov A, et al. Stable CW operation of field-plated GaN-AlGaIn MOSFETs at 19W/mm. IEEE Electron Device Lett, 2005, 26(8): 535
- [5] Tilak V, Green B, Kim H, et al. Effect of passivation on AlGaIn/GaN HEMT device performance. IEEE International Symposium of Compound Semiconductors, 2000, 10(2): 357
- [6] Gillespie J K, Fitch R C, Sewell J, et al. Effects of  $\text{Sc}_2\text{O}_3$  and  $\text{MgO}$  passivation layers on the output power of AlGaIn/GaN HEMTs. IEEE Electron Device Lett, 2002, 23(9): 505
- [7] Liu Jie, Shen Bo, Wang Maojun, et al. Pt/Au Schottky contacts to modulation-doped  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN heterostructures using pre-deposition surface treatment. Chin Phys Lett, 2002, 19(12): 1853
- [8] Li Chengzhan, Liu Jian, Liu Xinyu, et al. The correlations of AlN insert layer and current collapse for AlGaIn/GaN HEMTs. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(6): 1055 (in Chinese) [李诚瞻, 刘健, 刘新宇, 等. AlN 插入层与 AlGaIn/GaN HEMT 电流崩塌效应关系研究. 半导体学报, 2006, 27(6): 1055]
- [9] Kunii T, Totsuka M, Kamo Y, et al. A high reliability GaN HEMT with  $\text{SiN}$  passivation by cat-CVD. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2004, 10(24): 197
- [10] Hashizume T, Ootomo S, Hasegawa H, et al. Chemistry and electrical properties of surfaces of GaN and GaN/AlGaIn heterostructures. J Vac Sci Technol B, 2001, 19(4): 1675
- [11] Hideki H, Tamotsu H. Properties of surface states on GaN and related compounds and their passivation by dielectric films. Mater Res Soc Symp Proc, 2003, 743: L2. 6. 1
- [12] Vetry R, Zhang N Q, 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

## Performance Improvement of AlGaN/GaN HEMTs by Surface Treatment Prior to Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Passivation\*

Li Chengzhan<sup>†</sup>, Liu Dan, Zheng Yingkui, Liu Xinyu, Liu Jian, Wei Ke, and He Zhijing

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

**Abstract:** A passivation method is developed, and the effects and mechanism of this passivation method on the performance of AlGaN/GaN HEMTs are investigated. The key aspect of this passivation technique is that AlGaN/GaN HEMTs are pretreated with a mix of hydrochloric acid and hydrofluoric acid (HF : HCl : H<sub>2</sub>O = 1 : 4 : 20) prior to Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> deposition. Compared with devices passivated only with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> deposition, the devices fabricated with the mixing solution treatment prior to Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivation show minimal gate reverse leakage and little current collapse effect induced by DC bias stress. The density of the output power increases to 5.2 W/mm, exhibiting good electrical reliability. X-ray photoelectron spectroscopy is employed to measure the AlGaN surface before and after pretreatment. The decrease of the oxygen ratio in the AlGaN surface after surface treatment reduces the concentration of surface states and surface charge traps, which is regarded as the major reason for the performance improvement of AlGaN/GaN HEMTs.

**Key words:** AlGaN/GaN HEMTs; passivation; surface pretreatment; native oxide

EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2008)02-0329-05

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

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: lichzhan@163.com

Received 24 July 2007, revised manuscript received 28 August 2007

©2008 Chinese Institute of Electronics