

等离子体刻蚀凹栅槽影响 AlGaIn/GaN HEMT 栅电流的机理^{*}

李诚瞻[†] 庞磊 刘新宇 黄俊 刘键 郑英奎 和致经

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 对等离子体干法刻蚀形成的凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 肖特基电流增加的机理进行了研究. 实验表明, 凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 肖特基栅电流增加一个数量级以上, 击穿电压有一定程度的下降. 利用 AFM 和 XPS 的方法分析 AlGaIn 表面, 等离子体干法刻蚀增加了 AlGaIn 表面粗糙度, 甚至出现部分尖峰状突起, 增大了栅金属与 AlGaIn 的接触面积; 另一方面, 等离子体轰击使 AlGaIn 表面出现一定量的 N 空位, 相当于栅金属与 Al-GaN 接触界面处出现 n 型掺杂层, 使肖特基结的隧道效应加强, 降低了肖特基势垒. 由此表明, AlGaIn 表面粗糙度的增加以及一定量的 N 空位出现是引起栅电流急剧增大的根本原因.

关键词: 等离子体刻蚀; 凹栅槽; 栅电流; N 空位

EEACC: 2570

中图分类号: TN325⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)11-1777-05

1 引言

AlGaIn/GaN HEMTs 由于具有耐高温、高压和良好的高频大功率特性^[1,2]而备受关注. 近年来, AlGaIn/GaN HEMTs 在高频大功率方面取得了巨大的进展. 文献报道, 基于蓝宝石衬底的 AlGaIn/GaN HEMTs 在工作频率 $f = 4\text{GHz}$ 条件下, 输出功率密度达到 12W/mm , 功率附加密度 (PAE) 为 58% ^[3]. 基于 SiC 衬底的 AlGaIn/GaN HEMTs 输出功率密度甚至高达 32W/mm , PAE 超过 50% ^[4].

为了抑制电流崩塌效应, 提高功率特性, 很多研究者采用 GaN 或 AlGaIn 盖帽层材料结构增加表面到 2DEG 沟道的距离, 减小表面态对器件性能的影响^[5,6]. 然而, 盖帽层结构将导致栅的调制能力减弱, 肖特基势垒高度降低. 另一方面, 为了提高频率特性, 使 AlGaIn/GaN HEMTs 能有效地应用于 X 波段甚至毫米波频段, 必须缩短栅长. 但是缩短栅长将导致栅长与栅到沟道距离的比值大幅度减小, 从而使短沟道效应更加突出, 进一步削弱栅电压调制效应, 恶化 GaN 基 HEMTs 的频率性能. 因此, 采用凹栅槽结构, 减小栅金属到 2DEG 沟道的距离, 增强金属栅对 2DEG 的调制能力, 成为改善器件性能的重要选择^[7].

凹栅槽结构有利于抑制电流崩塌效应, 增强金属栅的调制效应, 提高器件线性特性, 提高 AlGaIn/GaN HEMTs 频率性能和功率性能^[7,8]. 然而, 与常规未钝化的平面结构相比, 凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基反向泄漏电流大幅度增加^[5,7], 击穿电压呈现下降趋势, 这必然影响器件的功率性能以及器件稳定性和可靠性. Cai 等人^[9]采用 F 基等离子体进行表面处理, 有利于减小肖特基反向泄漏电流, 但是并没有从根本上解决凹栅槽结构引起的肖特基反向电流增大, 而且 F 基等离子体处理将使阈值电压发生漂移, 不利于稳定器件的制作工艺.

GaN 基材料具有优良的化学稳定性, 目前主要采用 ICP-RIE 系统等离子体干法刻蚀技术形成凹栅槽结构^[10,11]. 等离子体干法刻蚀形成凹栅槽结构过程中的物理作用引起表面损伤, 被认为是 AlGaIn/GaN HEMTs 肖特基反向泄漏电流增大的主要原因^[7,12]. 本文采用原子力显微镜 (AFM) 测试刻蚀前后的 GaN 基外延材料表面粗糙度, 利用 X 射线光电子谱 (XPS) 检测刻蚀前后 AlGaIn 表面各元素变化情况以及是否形成聚合物. 深入研究等离子体刻蚀引起的表面损伤特性和肖特基泄漏电流增加的物理机理, 为优化形成凹栅槽工艺, 减小肖特基反向泄漏电流提供理论依据.

^{*} 国家重点基础研究发展规划 (批准号: 2002CB311903) 和中国科学院重点创新 (批准号: KG CX2-SW-107) 资助项目

[†] 通信作者. Email: lichzhan@163.com

2007-05-26 收到, 2007-07-05 定稿

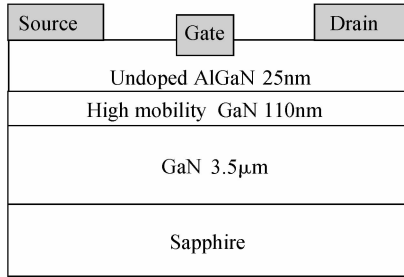


图 1 凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 示意图

Fig. 1 Schematic of AlGaIn/GaN HEMTs with recessed-gate structure

2 器件结构与工艺

本文采用由中国科学院物理研究所提供的常规 AlGaIn/GaN 外延材料,采用金属有机物化学气相淀积外延技术(MOCVD)制备,衬底为 50mm (0001)蓝宝石.材料结构由下至上分别为 3.5 μm GaN 缓冲层,110nm 高迁移率 GaN 层,25nm 非掺杂 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 势垒层.霍尔测试得出,室温下二维电子气的浓度为 $1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$,迁移率为 $1300 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$.

本文针对栅长为 $0.25 \mu\text{m}$ 的 AlGaIn/GaN HEMTs 进行研究,凹栅槽器件结构如图 1 所示.源漏电极蒸发 Ti/Al/Ti/Au 4 层金属,在 750°C 50s 条件下 N_2 氛围中进行快速热退火(RTA),实现约 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 低接触电阻率的欧姆接触.器件隔离采用离子注入的方法实现,隔离电阻超过 $10^8 \Omega/\square$.利用电子束光刻的曝光方式对电子束光刻胶 ZEP520 进行光刻,形成 $0.25 \mu\text{m}$ 栅线条图形.

为了实现凹栅槽结构,采用 ICP-RIE 系统对 AlGaIn 层进行等离子体干法刻蚀.刻蚀气源采用常用的 Cl_2/BCl_3 等离子体, Cl_2 和 BCl_3 气体流量分别为 25 和 15sccm,刻蚀的 ICP 功率和 RF 功率分别为 750 和 5W.在此刻蚀条件下,实现 AlGaIn 刻蚀速率为 $6 \text{ nm}/\text{min}$,刻蚀时间为 70s 时,刻蚀深度约为 7nm.刻蚀过程中使用 ZEP520 电子束光刻胶作掩膜.为了实现良好的剥离效果,采用二次电子束光刻对光刻胶 UVIII 进行光刻,最后蒸发栅金属采用 Ni/Au,栅长 $0.25 \mu\text{m}$,栅宽 $120 \mu\text{m}$.

3 结果与分析

与常规平面结构相比,凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 的最大输出电流没有明显的变化.器件的阈值电压从常规结构的 -5.2 V 增加到 -3.1 V ,最大跨导从 $173 \text{ mS}/\text{mm}$ 增大到 $251 \text{ mS}/\text{mm}$;器件的频率特性也略有提升.但是凹栅槽结构

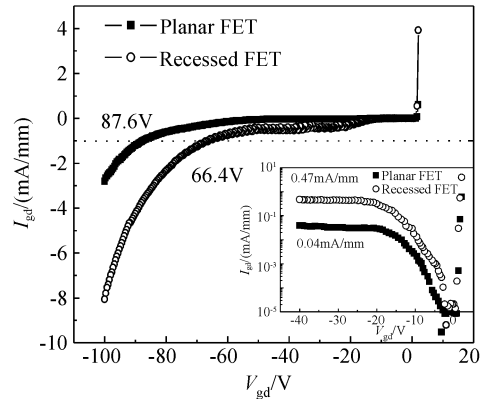


图 2 常规平面结构和凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 肖特基特性比较

Fig. 2 Comparisons of conventional planar and recessed AlGaIn/GaN HEMTs Schottky gate characteristic

AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基性能出现一定程度的恶化.图 2 示出常规平面结构和凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基特性,其中图 2 插图为 V_{gd} 在 $-40 \sim 0 \text{ V}$ 范围内的肖特基特性对数坐标曲线.在 $V_{\text{gd}} = -40 \text{ V}$ 时,平面结构 GaN 基 HEMT 的反向栅电流只有 $40 \mu\text{A}/\text{mm}$,而凹栅槽结构器件的栅电流高达 $466 \mu\text{A}/\text{mm}$,是平面结构的 10 倍以上.由此可见,等离子体干法刻蚀形成的凹栅槽结构将大幅度增加 AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基反向泄漏电流.定义肖特基反向击穿电压为肖特基反向泄漏电流达到 $1 \text{ mA}/\text{mm}$ 时所对应的栅漏电压.由图 2 可以看出,常规平面结构的肖特基反向击穿电压达到 87.6 V ,凹栅槽结构的击穿电压下降为 66.4 V ,远远小于常规平面结构的击穿电压.

利用 ICP-RIE 系统进行等离子体干法刻蚀,包括化学作用和物理作用两种机理.刻蚀中存在的物理作用,能获得较好的各项异性的刻蚀形貌,但是可能导致材料表面损伤,改变材料表面的化学配比,表面粗糙度增加及表面形貌变差; Cl 与 GaN 反应产物的挥发性差,可能在表面存在含 Cl 基聚合物.为了分析等离子体干法刻蚀 GaN 基材料的损伤情况,分别采用 AFM 检测 AlGaIn 表面粗糙度,采用 XPS 检测刻蚀后的 AlGaIn 表面化学配比状况以及表面是否存在 Cl 基聚合物.

利用接触式 AFM 对 AlGaIn 表面进行扫描,测试 AlGaIn 表面形貌以及表面粗糙度.图 3 示出刻蚀前后 AlGaIn 表面的 AFM 照片.其中 x, y 方向表示扫描区域, z 方向表示表面粗糙度.从 AFM 照片可以看出,刻蚀前 AlGaIn 表面平整度较高,刻蚀后的 AlGaIn 表面粗糙度明显增加,甚至出现少量尖峰状突起.利用 RMS 计算 AFM 扫描照片的表面粗糙

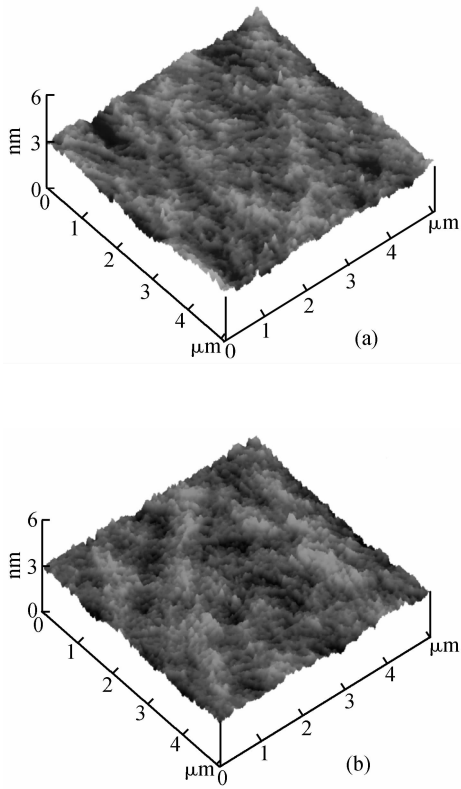


图 3 接触式 AFM 扫描捕获的 AlGaIn 表面粗糙度照片 (a) 刻蚀前; (b) 刻蚀后

Fig.3 AlGaIn surface roughness pictures measured by contact mode AFM (a) Before etching; (b) After etching

度,刻蚀前 AlGaIn 表面粗糙度约为 1.2nm,刻蚀后的 AlGaIn 表面粗糙度达到 3nm,尖峰突起处甚至超过 3nm.

电流强度可表示为 $I = \int J dS_{\perp}$, 说明电流强度与电流流过的面积成正比. 因此, 表面粗糙度增加引起的栅金属与 AlGaIn 之间的接触面积增大, 将导致通过金属-半导体肖特基结的电流强度大幅度增大. 另一方面, 尖峰状突起不但增加金属与 AlGaIn 的接触面积, 还将导致尖峰处电场增大, 进一步增大通过肖特基结的电流. 由此说明, ICP-RIE 系统刻蚀引起的表面粗糙度增加是引起 AlGaIn/GaN HEMTs 肖特基反向泄漏电流增加的重要原因之一.

改变材料表面的化学配比, 形成缺陷是干法刻蚀引起的一种常见的表面损伤. 利用 XPS 分析刻蚀前后 AlGaIn 表面的化学特性. 图 4 示出刻蚀前后 AlGaIn 表面 Ga3d, Ga2p 和 N1s 的 X 射线光电子谱图. 刻蚀过程中施加 RF 功率只有 5W, 图 4(a) 并没有出现文献[13]所述的 Ga2p XPS 峰值漂移的现象, 说明在刻蚀的过程中并没有破坏 AlGaIn 表面

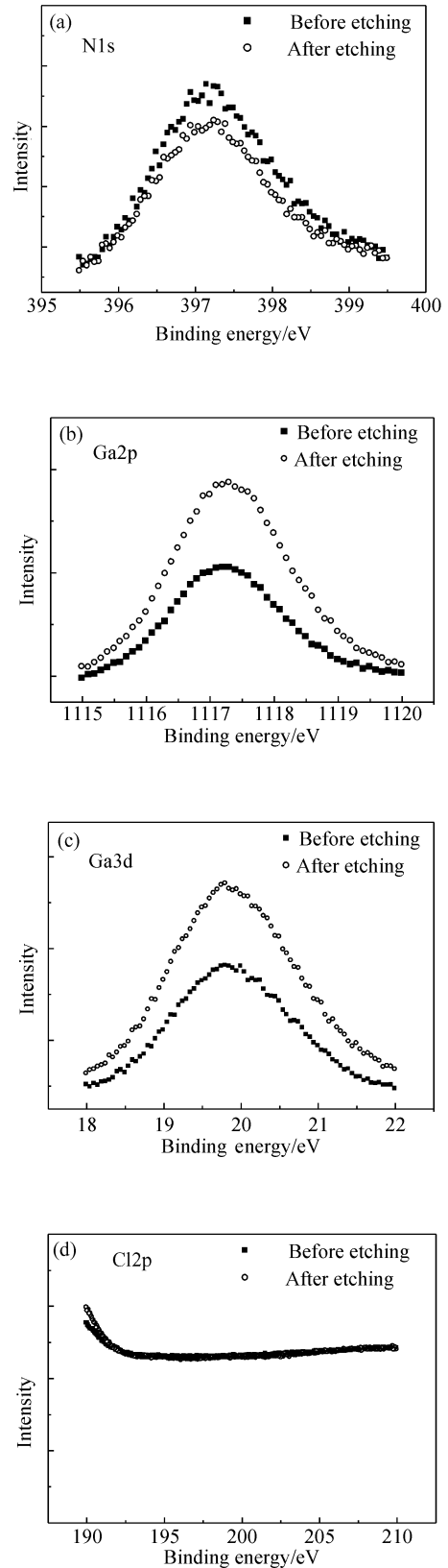


图 4 各种元素刻蚀前后的 XPS 光谱图

Fig.4 XPS of N1s, Ga2p, Ga3d and Cl2p spectra for samples before and after dry etching

的晶格完整性. 比较图 4(b) 和 (c) 中 N1s 和 Ga3d 的变化情况可以观察到, 刻蚀前 N1s/Ga3d 比值约为 1.20, 刻蚀后 N1s/G3d 比值下降到只有 1.03, 说明 ICP-RIE 系统等离子体干法刻蚀将导致 N1s/G3d 比值下降, 使 AlGaIn 表面 N 含量降低, 材料表面形成一定浓度的 N 空位.

利用 XPS 检测材料表面含 Cl 基的聚合物状况, 图 4(d) 示出 AlGaIn 表面 Cl 元素 X 射线光电子谱图. 在整个能量范围内, Cl 元素并没有形成 XPS 峰值. 说明利用 BCl_3/Cl_2 作为刻蚀气源, 在上述的工艺条件下对 GaN 基材料进行刻蚀, 不会在 AlGaIn 表面形成 GaCl_3 或 AlCl_3 等氯化物以及其他含 Cl 基的聚合物.

ICP-RIE 系统高密度等离子体有利于 Ga—N 键断裂, 等离子体干法刻蚀过程中损耗 N 元素, 在 AlGaIn 表面形成一定密度的 N 空位. 在 GaN 基外延材料中, N 空位相当于施主杂质. 刻蚀形成凹栅槽, 将有大量的 N 空位在栅金属和 AlGaIn 界面积累, 在界面处形成 n 型掺杂层. AlGaIn 的掺杂浓度越高, 金属和半导体之间的隧道效应越明显, 从而引起肖特基势垒降低, 使肖特基反向泄漏电流大幅度增加, 而且随着反向电压的提高, 反向泄漏电流更加明显.

4 结 论

本文比较了常规平面结构和凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 的肖特基特性, 观察到凹栅槽结构的肖特基反向泄漏电流远远高于平面结构, 击穿电压出现一定程度的下降. 利用 AFM 测试刻蚀前后的 AlGaIn 表面平整度, 通过 ICP-RIE 系统进行等离子体干法刻蚀增大表面粗糙度, 甚至出现部分尖峰状突起, 增加栅金属和 AlGaIn 表面的接触面积, 尖峰状突起还可能致尖峰处电场增大, 导致栅电流剧增. 采用 XPS 分析刻蚀后的表面损伤状况, 观察到 AlGaIn 表面出现一定量的 N 空位, 使得 AlGaIn 和栅金属接触界面形成 n 型掺杂层, 从而使肖特基反向泄漏电流大幅度增加, 肖特基击穿电压下降. 通过对凹栅槽结构 AlGaIn/GaN HEMTs 栅电

流增大机理的研究, 为进一步改善刻蚀条件, 优化刻蚀性能提供了充分的理论依据.

参 考 文 献

- [1] Saito W, Kuraguchi M, Takada Y, et al. High breakdown voltage undoped AlGaIn-GaN power HEMT on sapphire substrate and its demonstration for DC-DC converter application. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51(11): 1913
- [2] Lee C, Saunier P, Yang Jinwei, et al. AlGaIn-GaN HEMTs on SiC with CW power performance of $>4\text{W}/\text{mm}$ and 23% PAE at 35GHz. *IEEE Electron Device Lett*, 2003, 24(10): 616
- [3] Chini A, Buttari D, Coffie R, et al. 12W/mm power density AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire substrate. *Electron Lett*, 2004, 40(1): 73
- [4] Wu Y F, Saxler A, Moore M, et al. 30W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(3): 117
- [5] Wang W K, Lin P C, Lin C H, et al. Performance enhancement by using the n^+ -GaN cap layer and gate recess technology on the AlGaIn-GaN HEMT fabrication. *IEEE Electron Device Lett*, 2005, 26(1): 5
- [6] Coffie R, Buttari D, Heikman S, et al. p-capped GaN-AlGaIn-GaN high-electron mobility transistors (HEMTs). *IEEE Electron Device Lett*, 2002, 23(10): 588
- [7] Okamoto Y, Ando Y, Nakayama T, et al. High-power recessed-gate AlGaIn-GaN HFET with a field-modulating plate. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51(12): 2217
- [8] Moon J S, Wu S, Wong D, et al. Gate-recessed AlGaIn-GaN HEMTs for high-performance millimeter-wave applications. *IEEE Electron Device Lett*, 2005, 26(6): 348
- [9] Cai Y, Zhou Y G, Lau K M, et al. Control of threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs by fluoride-based plasma treatment: from depletion mode to enhancement mode. *IEEE Trans Electron Devices*, 2006, 53(9): 2207
- [10] Lee Y H, Kim H S, Yeom G Y, et al. Etch characteristics of GaN using inductively coupled Cl_2/Ar and Cl_2/BCl_3 plasmas. *J Vac Sci Technol A*, 1998, 16(3): 1478
- [11] Buttari D, Chini A, Palacios T, et al. Origin of etch delay time in Cl_2 dry etching of AlGaIn/GaN structures. *Appl Phys Lett*, 2003, 83(23): 4779
- [12] Shen L, Palacios T, Poblencz C, et al. Unpassivated high power deeply recessed GaN HEMTs with fluorine-plasma surface treatment. *IEEE Electron Device Lett*, 2006, 27(4): 214
- [13] Hinoki A, Hataya K, Miyamoto H, et al. Influence of dry etching on nitride semiconductor Schottky characteristics. The 2007 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 2004, PB7: 71

Effect of Plasma Dry Etching on Gate Leakage of Recessed AlGaIn/GaN HEMTs*

Li Chengzhan[†], Pang Lei, Liu Xinyu, Huang Jun, Liu Jian, Zheng Yingkui, and He Zhijing

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

Abstract: The mechanism for increasing gate leakage current in recessed-gate AlGaIn/GaN HEMTs, which are fabricated successfully by plasma dry etching, is investigated. Compared with conventional planar FETs, the gate leakage current of the recessed-gate AlGaIn/GaN HEMTs increases by 10 times, and the breakdown voltage decreases to some extent. AFM and XPS are employed to measure the AlGaIn surface before and after etching. The AlGaIn surface becomes rougher, and even some protuberances like awl appear during dry etching. Thus the contact area between the metal and the semiconductor increases for the rougher AlGaIn surface. On the other hand, some N vacancies generate plasma bombarding during dry etching. The N vacancies, which enhance the tunneling effect and reduce the Schottky barrier height, are regarded as n-type doped in the etched AlGaIn surface. All these experiments indicate that the significant increase in the gate leakage current is due to the increased roughness and the appearance of these N vacancies in the AlGaIn surface.

Key words: plasma dry etching; recessed-gate; gate leakage; N vacancies

EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2007)11-1777-05

* 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. KG CX2-SW-107)

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

Received 26 May 2007, revised manuscript received 5 July 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics