

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管肖特基 高温退火机理研究*

林若兵[†] 王欣娟 冯 倩 王 冲 张进城 郝 跃

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体技术重点实验室, 西安 710071)

(2007 年 9 月 18 日收到, 2007 年 12 月 5 日收到修改稿)

在不同应力条件下, 研究了 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管高温退火前后的电流崩塌、栅泄漏电流以及击穿电压的变化. 结果表明, AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管通过肖特基高温退火以后, 器件的特性得到很大的改善. 利用电镜扫描 (SEM) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 对高温退火前、后的肖特基接触界面进行深入分析, 发现器件经过高温退火后, Ni 和 AlGaIn 层之间介质的去除, 并且 AlGaIn 材料表面附近的陷阱减少, 使得肖特基有效势垒提高, 从而提高器件的电学特性.

关键词: AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管, 肖特基接触, 界面陷阱

PACC: 7340N, 7360L, 7330

1. 引 言

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 由于具有禁带宽度大、电子饱和速度高和击穿电场强等优点, 非常适合应用于高频、大功率与高温器件^[1]. 目前, 在蓝宝石衬底上的 AlGaIn/GaN HEMT 器件最大饱和电流为 1130 mA/mm^[2], 截止频率 f_T 可达到 107 GHz, 最大振荡频率 f_{max} 可达到 151 GHz^[3], X 波段连续波功率密度达到 30 W/mm^[4]. 尽管 AlGaIn/GaN HEMT 器件在微波大功率特性方面取得很大的进步, 但是仍然存在两个问题严重阻碍其在微波大信号领域的发展, 一个是电流崩塌问题, 一个是击穿电压问题. 为了抑制电流崩塌, 通常采用在器件栅、漏之间淀积钝化层的方法, 但这样会降低击穿电压. 采用场板 (FP) 结构能大幅度提高器件的击穿电压, 并且抑制电流崩塌效应, 但会降低器件的工作频率, 增加工艺复杂度. 而采用肖特基高温退火, 较好地抑制了电流崩塌, 极大提高器件的击穿电压, 同时也提高了器件的频率特性^[5], 且工艺简单, 有利于提高器件成品率, 节约制造成本.

目前关于肖特基退火的报道主要集中在器件的

电流特性上, 而机理的研究报道比较少. Miura 等人认为高温退火减少金属与 AlGaIn 界面的缺陷或者形成岛状 Ni 的氧化物, 从而减少了泄漏电流^[6,7]. 金属与 AlGaIn 之间的紧密接触或材料的相对介电常数增大而提高了肖特基势垒高度^[8]. 以及退火过程中氧作用下 AlGaIn 材料形成 Ga 空位、肖特基表面形成氧化物等引起了肖特基势垒的增加^[9], 减小泄漏电流, 抑制电流崩塌, 提高器件的击穿电压. 目前研究者对肖特基高温退火机理没有统一的说法, 还有待更进一步深入研究.

本文根据退火前后的肖特基电流崩塌量的不同、栅击穿电压的差异, 利用 SEM 和 XPS 对肖特基接触的界面进行分析, 研究退火、前后界面处 Ni, Ga, Al, N, O 等的变化, 深入探讨肖特基退火提高器件特性的机理.

2. 材料和器件结构与参数

实验中采用低温 MOCVD 方法在蓝宝石 (sapphire) 衬底基片 (0001) 面上外延生长 AlGaIn/GaN 异质结二维电子气 (2DEG) 材料. 材料层结构由下而上依次为 50 nm GaN 成核层, 850 nm 未掺杂 GaN 外

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60736033) 资助的课题.

[†] E-mail: ruobingl@126.com

延层 30 nm 的未掺杂 AlGaIn 层, PL 谱测量后计算得到的 AlGaIn 层 Al 组分为 20% ($\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$). Hall 效应测量显示, 材料迁移率 μ 和 2DEG 浓度分别为 $1063 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 和 $1.38 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 材料方块电阻为 $450 \Omega/\square$.

器件台面隔离采用 ICP 干法刻蚀, 刻蚀深度为 250 nm. 源、漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ni/Au (30 nm/180 nm/45 nm/55 nm) 850°C 在 N_2 中退火 45 s, 栅金属采用 Ni/Au (20 nm/1200 nm). 制备的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件为 U 形栅结构, 源漏之间的距离为 4 μm , 栅长为 1 μm 、宽为 200 μm . 用 HP4156B 和 AgilentB1500 精密半导体参数测试仪、Signatone S1160 探针台测试器件特性, 采用 RTP-500 快速热退火炉在 N_2 气氛中对器件进行热处理. 用 TLM 测试的材料方块电阻为 $500 \Omega/\square$.

3. 实验与分析

将 AlGaIn/GaN HEMTs 器件在应力下进行 I - V 测试. 栅漏采用 ($V_{\text{GS}}, V_{\text{DS}}$) 分别为 (-8 V, 10 V) (-13 V, 5 V) (-18 V, 0 V) 的电压, 确保器件的栅漏电压为 -18 V, 而改变栅源电压使之分别为 -8 V, -13 V, -18 V. 所加应力的作用时间为 2 min, 然后在栅上加 1 V 电压, 源接地, 漏以 0.1 V 的步长从 0—7 V 的测量器件的源漏电流崩塌.

图 1 是 AlGaIn/GaN HEMTs 器件肖特基退火前, 应力作用下的 I - V 曲线图. 当应力为 ($V_{\text{GS}}, V_{\text{DS}}$) = (-8 V, 10 V) (-13 V, 5 V) (-18 V, 0 V) 时, 在漏电压为 5 V 下, 电流崩塌量最大, 分别为 59%, 75%, 79%. 图 2 是与图 1 为同一个样片, 在 N_2 气氛用 500°C 的高温中退火 10 min 后, 应力下测量的 I - V 曲线图, 在相同的应力下, 源、漏电流崩塌量分别为 40%, 49%, 52%. 器件退火后比退火前的源、漏电流崩塌量分别减少 19%, 26%, 27%. AlGaIn/GaN HEMTs 器件退火后电流崩塌得到较好的控制, 说明退火后 AlGaIn 材料表面附近的陷阱也得到较好的抑制.

图 3 是同一个 AlGaIn/GaN HEMT 器件在退火前、后的栅漏反向 I_G - V_{GD} 曲线图. 从图中可以看出器件的肖特基在 N_2 气氛中用 500°C 的高温退火 10 min 后, 器件栅漏的反向漏电流得到很好的改善. 在相同的泄漏电流 0.3 $\mu\text{A}/\text{mm}$ 下, 退火前所加的反向电

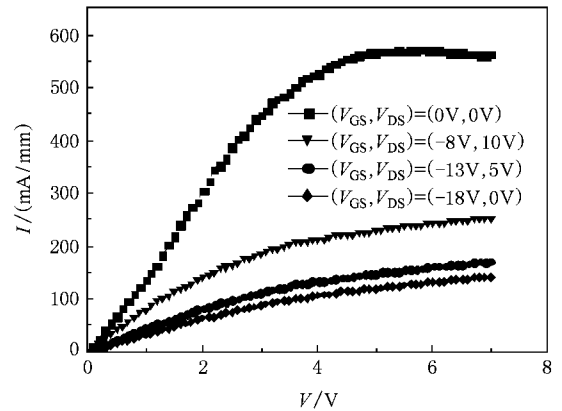


图 1 肖特基退火前应力下 I - V 曲线

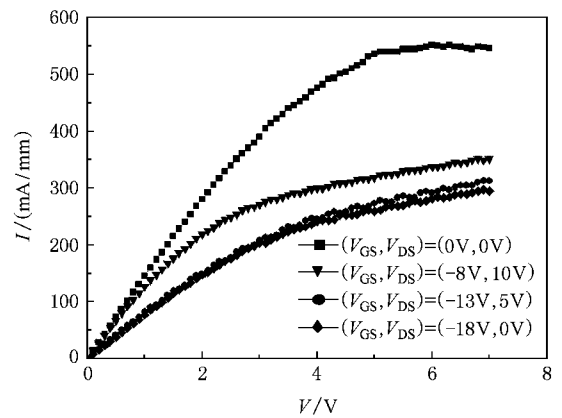


图 2 肖特基退火后应力下 I - V 曲线

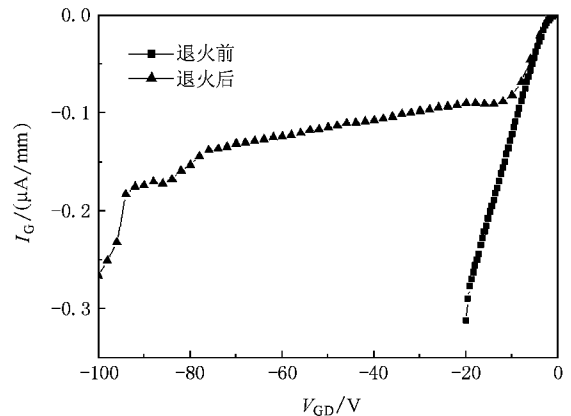


图 3 退火前、后的肖特基栅漏电流

压为 -20 V, 而退火后反向电压增加到超过 -100 V, 器件击穿电压有了极大的提高.

另外, 在 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的制造过程中, AlGaIn/GaN 异质结材料不可避免的暴露于空气中形成的氧化层, 在淀积栅金属前用氧等离子体刻蚀所引入的氧杂质等. 为了确定这些成分的存在, 对

AlGaN/GaN 异质结材料表面进行了 XPS 图谱测量。从图 4 中可以看出 X 射线激发的各个元素不同壳层的光电子能谱,除了 Al, Ga, N 的峰值比较明显外, C, O 峰值也比较明显;而采用 Ar 离子对 AlGaN 材料表面轰击 30 min 后,再进行 XPS 图谱测量,如图 5,发现 C 峰变得不明显,而 O 峰也有很明显的降低。说明 C 和 O 杂质主要存在于 AlGaN 材料表面很薄的一层,主要是 AlGaN 材料受到的来自光刻胶等无机物污染和空气的氧化。在淀积栅金属之前采用氧等离子体刻蚀,会减少有机物的污染,但却引起氧在 AlGaN 材料表面薄层的注入。

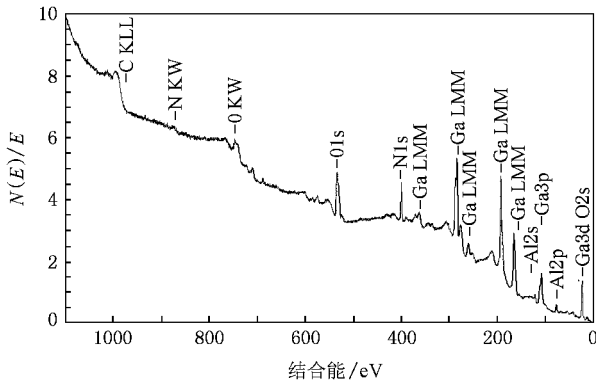


图 4 AlGaN/GaN 材料表面 XPS 谱

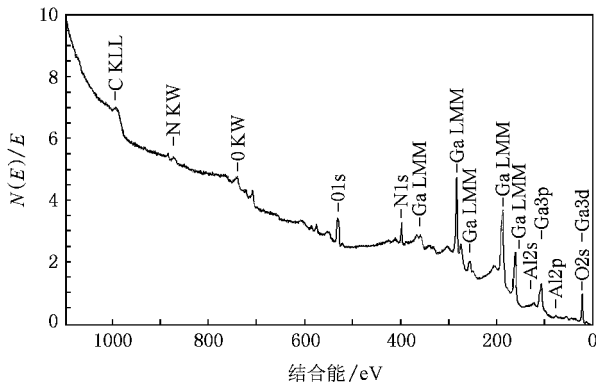


图 5 用 Ar 离子轰击 30 min 后的材料表面 XPS 谱

用同一晶片上的异质结材料,不进行台面隔离,直接在材料表面淀积 20 nm/200 nm 的 Ni/Au。接着在 RTP-500 快速热退火炉 N_2 气氛中用 500℃ 高温退火 10 min,然后用 KI 腐蚀表层的 Au。图 6 是去除 Au 层后的 SEM 图,图中的六角形黑斑点,是肖特基退火过程中 Ni 向 AlGaN 材料表面扩散,填充材料表面的缺陷,使得金属与 AlGaN 材料表面形成紧密的肖特基接触,减少了界面处的缺陷密度。

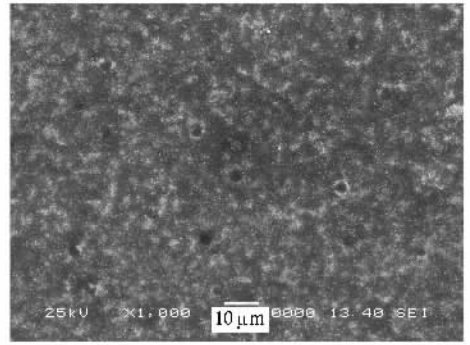


图 6 退火后 Ni 填充材料表面

用 XPS 图谱测量退火前、后界面的 Ga, Al, N 的比例,如表 1 所示,退火后 N 元素的比例从退火前的 37.8% 提高到 44.3%,即退火后界面附近 AlGaN 材料的 V_N 氮空位减少,陷阱密度降低,从而抑制了器件的电流崩塌,同时减少电子通过陷阱隧穿势垒的通道,而提高肖特基的有效势垒。用化合物结合能谱拟合来分析退火后界面附近 AlGaN 材料 V_N 减少的原因:在 Ni 层的 XPS 图谱测量中,发现 Ni 层中有相当的一部分 O 和少量的 Ga,而 Ni 和 Ga 峰的结合能谱拟合中得出 Ni 主要以 Ni 和 NiO 存在而 Ga 以 Ga_2O_3 形式存在,说明肖特基退火过程中有部分 Ga 向 Ni 层中扩散,使得 AlGaN 材料界面附近的 Ga 百分比相对下降而 N 百分比相对上升。在实验中还发现,退火后界面处的 Al 和 Ga 氧化物的百分比比退火前有少量的增加,这也是 V_N 减少的一个因素。

表 1 肖特基退火后 Al, Ga, N 比例的变化

	退火前/%	退火后/%
Al	17.1	16.7
Ga	45.1	39.0
N	37.8	44.3

为了进一步分析肖特基高温退火提高器件特性的机理,结合实验结果给出了 AlGaN/GaN HEMT 肖特基栅退火前、后平衡状态下的能带图(如图 7 所示)。图 7(a)为退火前的肖特基平衡时的能带图,栅金属 Ni 与 AlGaN 层之间有一层很薄的介质层,且介质层的缺陷密度很高,电子可以很容易的隧穿通过介质层,但介质层的两边存在着一定的电势差,此时肖特基势垒为

$$q\phi_{\text{Bab}} = q\phi_m - q\chi - q\Delta\phi_0, \quad (1)$$

其中, ϕ_{Bab} 为退火前的肖特基势垒高度, ϕ_m 为金属的

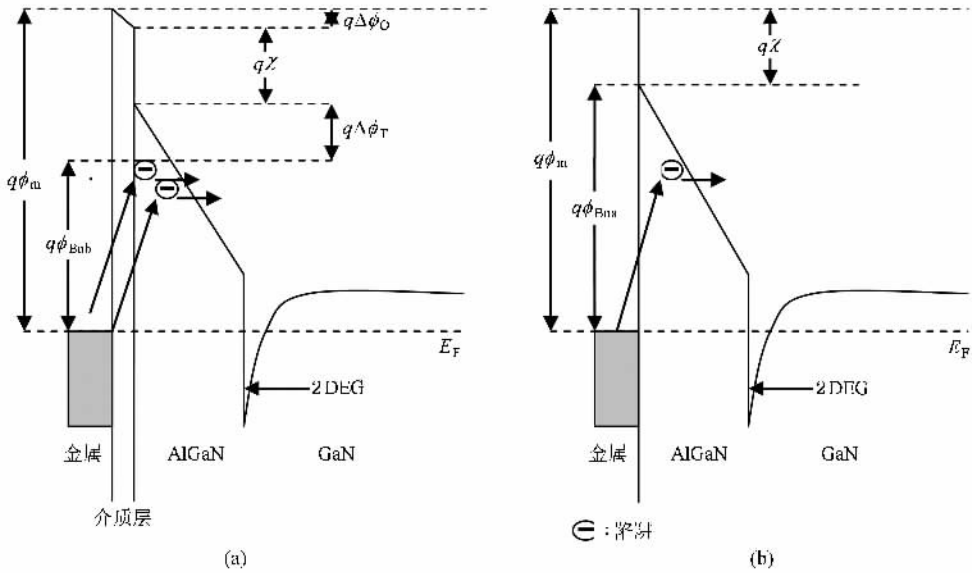


图 7 AlGaIn/GaN 异质结肖特基退火前、后的平衡状态下的能带图 (a)退火前 (b)退火后

功函数 χ 电子的亲合能 $\Delta\phi_0$ 为氧薄层的电势差. 而图 (b) 中肖特基退火后, Ni 和 AlGaIn 材料表面的氧形成了 p-NiO, NiO 的团聚或向 Ni 金属扩散, 而 Ni 金属通过介质层, 到达 AlGaIn 材料的表面, 填充缺陷, 加大肖特基金属与 AlGaIn 材料的有效接触面积, 最后 Ni 金属与 AlGaIn 材料形成紧密的接触, 相当于去除肖特基的栅金属与 AlGaIn 材料之间的介质层, 从而肖特基势垒变高为

$$q\phi_{Bna} = q\phi_m - q\chi. \quad (2)$$

另一方面肖特基退火前, 界面附近的 AlGaIn 材料有着较高的陷阱, 部分电子可以通过陷阱辅助隧穿肖特基势垒, 使得肖特基有效势垒降低为

$$q\phi_{Bnh} = q\phi_m - q\chi - q\Delta\phi_0 - q\Delta\phi_T, \quad (3)$$

其中 $q\Delta\phi_T$ 为陷阱辅助电子隧穿势垒引起肖特基势垒降低的量. 而肖特基退火后, Ni 金属向 AlGaIn 表面扩散, 填充材料表面缺陷形成紧密的肖特基接触, 同时退火后, 界面附近 AlGaIn 材料的 V_N 明显减少, 大大的降低了界面附近的陷阱密度, 因而辅助电子隧穿通过肖特基势垒的通道减少, 肖特基的势垒高度可以近似为

$$q\phi_{Bna} = q\phi_m - q\chi. \quad (4)$$

AlGaIn/GaN HEMTs 器件的肖特基退火, 有利于电流崩塌的抑制、肖特基有效势垒高度的增加, 提高器件的反相击穿电压, 从而提高器件微波功率特性.

图 8 是同一个器件退火前、后肖特基正向电流 I_C - V_{GD} 半对数坐标曲线, 通过拟合肖特基势垒高度

分别为前的 0.63 eV 和退火后的 0.82 eV, 肖特基势垒高度退火后比退火前提高了 0.19 eV. 其结果验证了上面的结论.

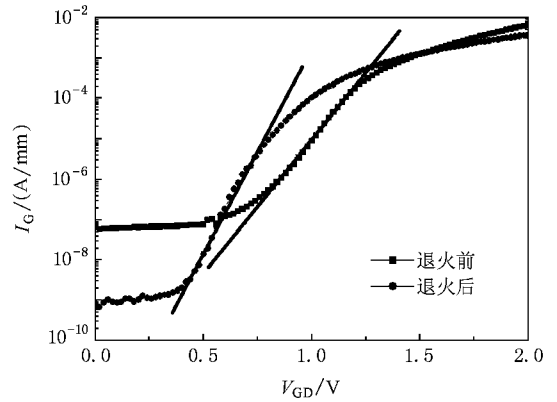


图 8 退火前、后肖特基正向 I-V 曲线

4. 结 论

通过 SEM 和 XPS 对肖特基退火前、后的界面附近元素成分进行分析, 退火后 Ni 的氧化形成 p-NiO 和 Ni 向 AlGaIn 材料表面扩散形成紧密的接触, 相当于去除退火前 Ni 与 AlGaIn 材料之间的介质层; 同时, 由于退火后 Ga 向肖特基金属 Ni 的扩散和 Al, Ga 在退火后氧化百分比比退火前略微增加, 降低了界面附近 AlGaIn 材料的 V_N , 减少辅助电子隧穿势垒的陷阱. 这两原因共同作用, 提高肖特基势垒有效高

度,从而提高器件的击穿电压.通过 I_G-V_{GD} 半对数坐标拟合方法计算出退火前后肖特基势垒高度,充分证明器件在退火后肖特基接触具有明显改善.

- [1] Kim H ,Thompson R M ,Tilak V ,Prunty T R ,Shealy J R ,Eastman L F 2003 *IEEE Electron Device Letters* **24** 421
- [2] Wu Y F ,Keller B P ,Fini P 1997 *Electronics Letters* **33** 1742
- [3] Khan M A ,Kumar V ,Lu W 2002 *Electronics Letters* **38** 252
- [4] Wu Y F ,Saxler A ,Moore M ,Smith P ,Sheppard S ,Chavarkar P M ,Wisleder T ,Mishra U K ,Parikh P 2004 *IEEE Electron Device Letter* **25** 117
- [5] Arulkumaran S ,Ng G I ,Liu Z H ,Bu J ,Aggerstam T ,Sjödén M 2006 *Applied Physics Letters* **88** 023502
- [6] Miura N ,Oishi T ,Nanjo T ,Saita M ,Abe Y ,Ozeki T ,Ishikawa H ,Egawa T 2004 *IEEE Trans Electron Dev.* **51** 297
- [7] Wang C ,Feng Q ,Hao Y ,Wan F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6085 (in Chinese)[王 冲、冯 倩、郝 跃、万 辉 2006 物理学报 **55** 6085]
- [8] Arulkumaran S ,Egawa T ,Ishikawa H ,Umeno M ,Jimbo T 2001 *IEEE Trans. Electron Dev.* **48** 573
- [9] Jeon C M ,Jang H W ,Lee J L 2002 *Appl. Phys. Lett.* **82** 391

Study on mechanism of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors by high temperature Schottky annealing^{*}

Lin Ruo-Bing[†] Wang Xin-Juan Feng Qian Wang Chong Zhang Jin-Cheng Hao Yue

(*Microelectronics Institute Xidian University ,Key Laboratory for Wide Band-Gap Semiconductor Technology , Xi 'an 710071 , China*)

(Received 18 September 2007 ; revised manuscript received 5 December 2007)

Abstract

Under different stress , the current collapse , gate current leakage and breakdown voltages of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors change before and after high temperature annealing. The results show that characteristics of devices are greatly improved for AlGaIn/GaN high electron mobility transistor after Schottky high temperature annealing. Interface of Schottky contacts is studied by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) before and after high temperature annealing. The analysis indicates that eliminating the medium between Ni and AlGaIn and reducing of traps near the surface of AlGaIn can improve the effective Schottky barrier , which can enhance the electric characteristics of the devices.

Keywords : AlGaIn/GaN high electron mobility transistors , Schottky contact , interface traps

PACC : 7340N , 7360L , 7330

^{*} Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60736033).

[†] E-mail : ruobingl@126.com