

AlGaIn/GaN HEMT 在 N₂ 中高温退火研究

王 冲, 张金风, 郝 跃, 冯 倩,
杨 燕, 张进城

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

摘要: 通过 N₂ 气氛中对蓝宝石衬底 AlGaIn/GaN HEMT 在 200~600℃ 退火 1 min 和 5 min 的多批实验, 研究了在不同温度和时间退火冷却后器件直流参数的变化. 对器件欧姆接触和肖特基接触在高温退火前后的特性进行了对比分析, 确定出了最有利于高电子迁移率晶体管特性提高的退火温度为 500℃, 退火时间为 5 min. 该条件退火后高电子迁移率晶体管最大跨导提高 8.9%, 肖特基栅反向漏电流减小 2 个数量级, 阈值电压绝对值减小. 退火后肖特基势垒高度提高, 在减小栅泄漏电流的同时对沟道电子也有耗尽作用, 这是饱和电流和阈值电压变化的主要原因. 采用扫描电子显微镜观察肖特基退火后的形貌, 500℃ 未发现明显变化, 600℃ 有起泡现象.

关键词: 高电子迁移率晶体管; 泄漏电流; 阈值电压; 接触电阻

中图分类号: TN325⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2006)06-0862-04

Study of AlGaIn/GaN HEMT high temperature anneal in N₂

WANG Chong, ZHANG Jin-feng, HAO Yue, FENG Qian
YANG Yan, ZHANG Jin-cheng

(Ministry of Edu. Key Lab. of Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices,
Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: Annealing experiments were carried out at 200~600℃ for 1min and 5min on many batches of AlGaIn/GaN HEMTs on the sapphire, and the DC characteristics before annealing and after cooling were compared and analyzed. Also measured were the change of the characteristics of the ohmic contacts and the schottky contacts. It is found that the optimized annealing condition for improving the device characteristics is 500℃ annealing for 5min. Under this condition the maximum transconductance is raised by 8.9%, the reverse leakage of schottky gate is reduced by two orders of magnitude, and the threshold voltage moves toward the positive direction. The elevation of the schottky barrier height after annealing causes the reduction of gate leakage and the more depletion of channel electrons, which also leads to the change of the saturation current and the threshold voltage. The surface morphology of the schottky contact is observed after annealing by SEM. No obvious change is found for 500℃-annealed samples, but bubbling appears for 600℃-annealed ones.

Key Words: high electron mobility transistors; leakage current; threshold voltage; contact resistance

AlGaIn/GaN 异质结高电子迁移率晶体管(HEMT)在高温器件及大功率微波器件方面有非常好的应用前景^[1]. 随着 AlGaIn/GaN 异质结材料特性和器件关键工艺的技术水平逐渐提高, AlGaIn/GaN HEMT 特性大幅提高^[2,3]. 器件的栅肖特基接触工艺中由于自然氧化层和表面玷污及材料缺陷的原因会使接触特性不很理想. 国外对于采用高温退火提高肖特基特性的研究已有报道^[4,5], 而国内对 AlGaIn/GaN 异质结肖特

收稿日期: 2006-01-21

基金项目: 国家部委 973 计划项目(513270407); 国家部委科技预研项目(41308060106); 国家部委科技重点实验室基金项目(51433040105DZ0102)

作者简介: 王 冲(1978-), 男, 西安电子科技大学博士研究生.

基接触高温退火研究还未见报道. 笔者对制作完成的器件在不同温度和时间进行 N₂ 气氛快速热退火, 在完全冷却后进行特性对比, 确定了最优的退火条件, 有助于提高器件肖特基性能, 提高器件直流特性.

1 器件参数

采用 MOCVD 方法在蓝宝石衬底基片(0001)上外延生长了 AlGaIn/GaN 异质结二维电子气(2DEG)材料. 蓝宝石衬底厚度为 330 μm, 材料层结构由下而上依次为: 850 nm 未掺杂 GaN 外延层, 5 nm 未掺杂 AlGaIn 隔离层, 12 nm Si 掺杂 AlGaIn 层(Si 掺杂浓度 2 × 10¹⁸ cm⁻³), 6 nm 未掺杂 AlGaIn 帽层. PL 谱测量后计算得到的 AlGaIn 层 Al 组分为 27%(Al_{0.27}Ga_{0.73}N). Hall 效应测量显示, 室温下蓝宝石衬底上生长的材料电子迁移率 μ 和 2DEG 面密度分别为 1 028 cm²/(Vs)和 1.6 × 10¹³ cm⁻².

器件台面隔离采用 ICP 干法刻蚀, 刻蚀深度为 250 nm; ICP 干法刻蚀气体采用 Cl₂ 和 Ar 4 : 1 的比例, ICP 上电极功率 600 W, 自偏压为 -180 V, 反应室压力为 1 Pa. 源漏欧姆接触采用 Ti/Al/Ni/Au (30 nm/180 nm/40 nm/60 nm) 830 °C N₂ 中退火 30 s, 栅金属采用 Ni/Au (30 nm/200 nm). 制备的 AlGaIn/GaN HEMT 栅长为 1 μm, 栅宽为 50 μm, 源漏间距为 4 μm. 肖特基 C-V 测试结构内外环直径分别为 120 μm 和 200 μm, TLM 结构宽度为 100 μm, 两测试结构都与 HEMT 在同一片材料上制作, 并规则地分布于器件周围. 使用 HP4156B 精密半导体参数测试仪和 HP8720D 网络分析仪测试了器件直流和高频特性, C-V 测试采用 Keithley 590 C-V 分析仪进行, 采用 RTP-500 热退火炉器件进行 N₂ 中加温. 器件在栅压 2 V 下最大饱和电流为 1.05 A/mm; 在源漏偏置为 6 V 时最大跨导为 251 mS/mm; 在源漏偏置 8 V 栅偏置 -0.5 V 时截止频率 f_t 为 10.6 GHz, 表明器件具有良好的性能.

2 退火实验和讨论

由于退火实验具有一定程度的破坏性, 选取了在同一个蓝宝石衬底上一次流片而成的多个 AlGaIn/GaN HEMT 器件按不同退火条件分批测量. 退火温度 200 ~ 600 °C, 每个温度下退火时间长度有 1 min 和 5 min 两种, 因此共分 10 批退火后测量. 每个退火条件均采用 5 个以上器件, 由于器件性能差异, 器件特性随退火温度的变化采用变化量所占百分比的多个器件平均值来表示. 最大饱和电流和最大跨导均在栅压为 2 V, 漏压为 6 V 时测量.

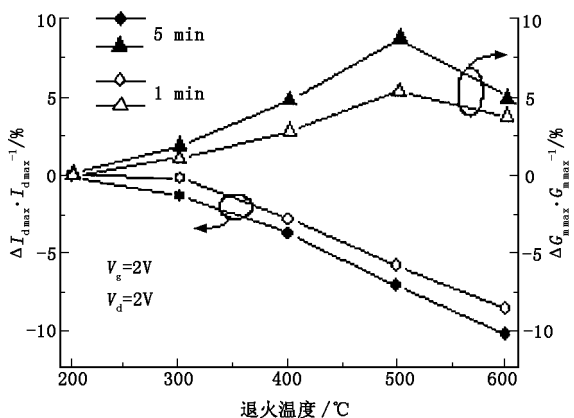


图 1 不同退火温度及时间下器件最大饱和电流和最大跨导的变化趋势

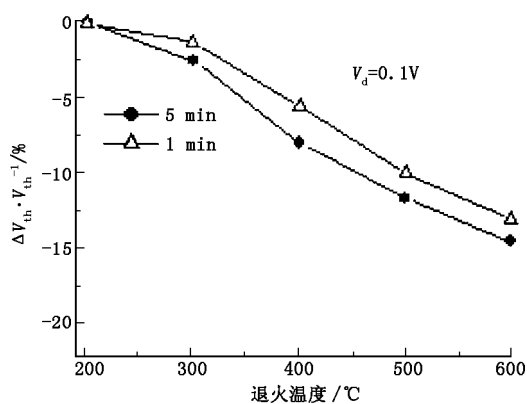


图 2 不同退火温度及时间下阈值电压的变化趋势

不同温度和时间退火并冷却后, 测量得到了器件栅压为 2 V 时最大饱和电流和源漏偏置 6 V 时的最大跨导的变化规律, 如图 1 所示. 随着退火温度由 200 °C 升高至 600 °C, 最大饱和电流不断下降. 退火后器件最大跨导都有不同程度提高, 在 500 °C 退火 5 min 后跨导提高量最大, 提高 8.9%, 这是由于该退火温度下肖特基栅控能力得到提高从而提高了跨导. Takuma 等人^[4]通过退火提高 AlGaIn/GaN HEMT 器件性能的结果为

跨导未退化,而笔者的实验结果表明跨导有所提高.图 2 表示器件阈值电压的变化随退火温度的增大而增大,其绝对值不断减小.对比退火时间 1 min 和 5 min 的变化规律,发现变化趋势大致相同,只是 5 min 退火的变化程度略大,说明退火温度的变化主要影响器件的性能.

肖特基反向泄漏电流的退火实验结果是取退火后每批器件中泄漏电流最小的曲线作对比,如图 3 所示.器件栅肖特基反向泄漏电流随退火温度增大逐渐减小,在退火温度高于 300 °C 后栅泄漏电流减小更为明显,500 °C 退火后减小两个数量级.图 4 为采用 TLM 计算得到的不同温度退火后材料方块电阻 R_{sh} 和比接触电阻 ρ_c 的变化曲线,由于存在测量误差,可以认为在退火温度升高下方块电阻和比接触电阻几乎未发生变化.因为在 5 min 退火后器件特性改变更明显,所以图 3 和 4 中未列出 1 min 退火的变化曲线.

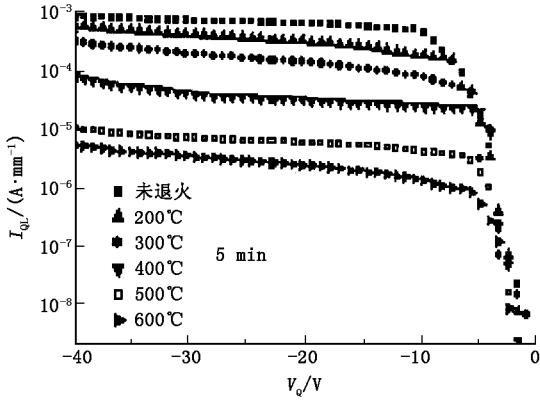


图 3 器件栅泄漏电流在不同退火温度下的对比

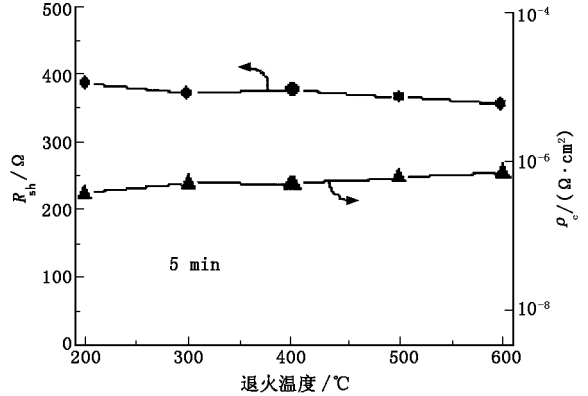


图 4 方块电阻和比接触电阻不同退火温度下的变化

TLM 模型计算结果进一步验证了 200~600 °C N_2 气氛退火后材料特性稳定,欧姆接触未退化,所以对器件在退火后饱和电流、跨导及阈值电压变化的研究重点集中在器件肖特基特性的改变.栅肖特基反向泄漏电流的减小能提高器件击穿特性,这得益于肖特基势垒高度的提高. Takuma 等人^[4]对 Ni/Pt/Au 肖特基退火进行研究,也得到了肖特基势垒提高的结论. AlGaIn/GaN 异质结材料存在表面陷阱,退火过程中 Ni 向 AlGaIn 层逐渐扩散能够填充 AlGaIn 表面的陷阱,使金-半接触性能改善,从而提高肖特基势垒.笔者对材料做了 X 射线光电子能谱(XPS)分析,图中 KVV 和 LMM 为俄歇谱,其余为光电子能谱,如图 5 所示. XPS 分析证实了表面氧化层的存在,认为在肖特基表面处理工艺还未最优化的情况下,工艺中未完全去除的氧化层对肖特基的影响在退火中被减弱也是肖特基特性改善的原因.

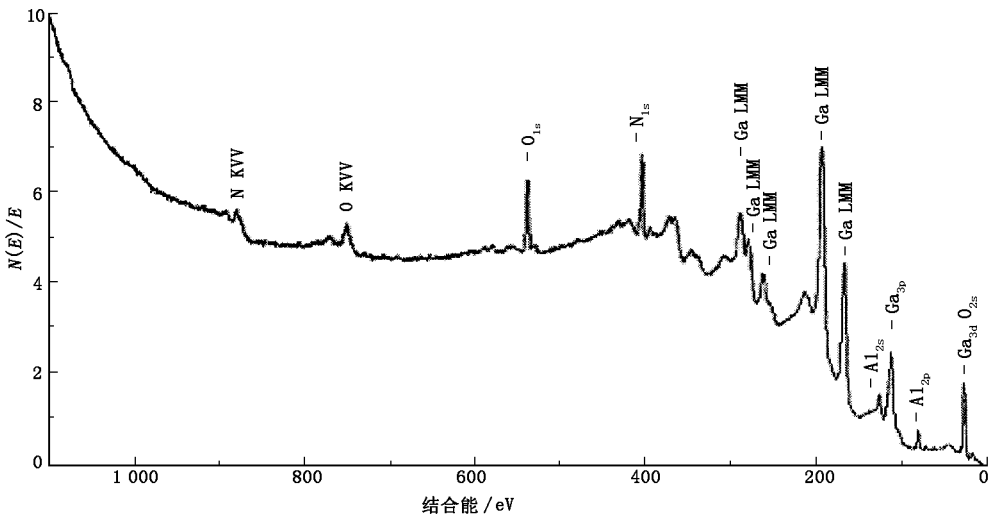


图 5 AlGaIn/GaN 异质结的 XPS 图谱

图 1 中饱和电流随退火温度提高而下降,这是由于随退火温度提高肖特基势垒高度提高从而影响 2DEG 密度. 2DEG 密度与肖特基势垒高度关系为^[6]

$$N_{s_{2D}} = \sigma_{pol}/q - (\epsilon_0 \epsilon_1 / dq^2) (q\Phi_B - \Delta E_C) + N_D (d - d_i)^2 / (2d) \quad (1)$$

其中 $N_{s_{2D}}$ 为 2DEG 密度, σ_{pol} 为极化电荷, q 为电子电量, ϵ_0 和 ϵ_1 分别为空气和 AlGaIn 的介电常数, $q\Phi_B$ 为肖特基势垒高度, ΔE_C 为导带不连续性, N_D 为 AlGaIn 掺杂浓度, d 和 d_i 分别为 AlGaIn 层总厚度和空间隔离层的厚度. 从式(1) 看出, 提高的势垒高度减小了 2DEG 密度.

图 2 中阈值电压随退火温度升高而绝对值减小, 这是与图 1 同样的原因引起. 阈值电压 V_T 与势垒高度的关系为^[7]

$$V_T = \Phi_B - \Delta E_C / q - qN_D (d - d_i)^2 / (2\epsilon_0 \epsilon_1) - \sigma_{pol} d / (\epsilon_0 \epsilon_1) \quad (2)$$

肖特基势垒升高, 栅对 2DEG 的耗尽作用增强, 使负的阈值电压绝对值减小.

从饱和电流和跨导随退火温度的变化规律中得到了最大跨导提高最明显的退火条件为在 500℃ N₂ 气氛下持续 5 min, 图 6 和图 7 为器件在该条件退火前后输出特性和转移特性的对比. 器件输出特性中相同栅偏压下的电流有所下降, 这是由于肖特基势垒提高对 2DEG 耗尽造成的, 但器件栅肖特基势垒提高后器件体现出可工作在更高正向栅压的潜力和更好的栅控能力. 器件转移特性中电流随栅压的变化曲线用半对数坐标表示, 这样能更明显地对比出在器件夹断区沟道泄漏电流的变化. C-V 测量后计算得到的器件 GaN 缓冲层本底电子密度仅为 $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 并且测量得到有源区泄漏电流仅为纳安级, 所以沟道夹断后泄漏电流也明显下降得益于栅泄漏电流的减小. 从器件转移特性图中还可以看出向右移动的趋势, 这表明了阈值电压的正方向移动.

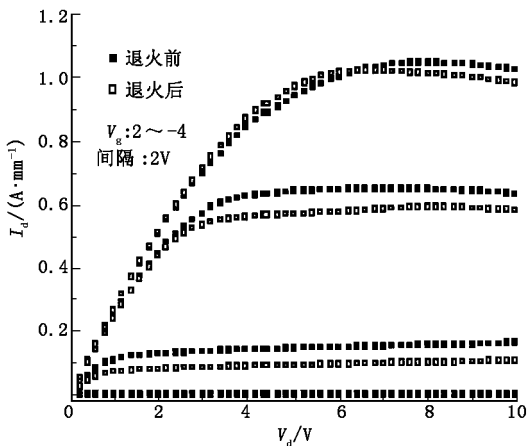


图 6 器件输出特性在 500℃ 时经过 5 min 退火前后对比

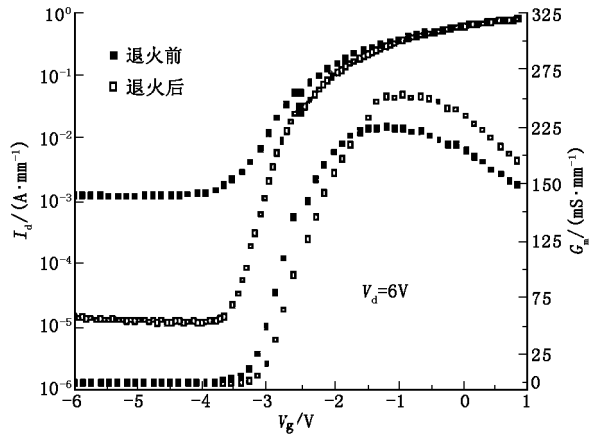


图 7 器件转移特性在 500℃ 时经过 5 min 退火前后对比

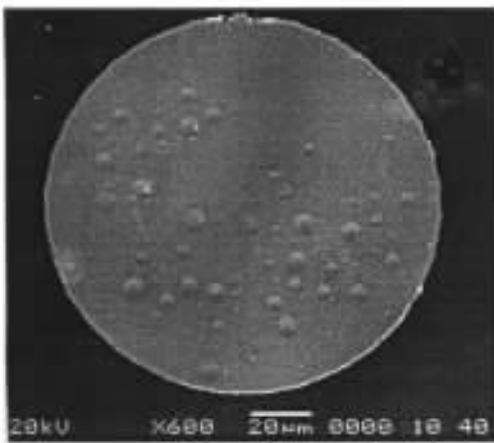


图 8 600℃ 时经过 5 min 退火后肖特基金属表面形貌

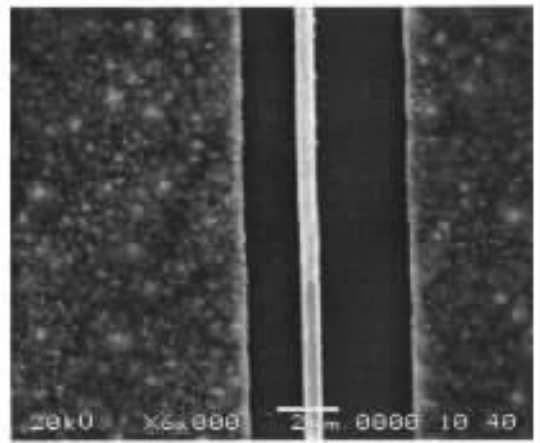


图 9 500℃ 时经过 5 min 退火后肖特基栅形貌

采用扫描电子显微镜(SEM)对退火后的器件进行观察发现:当退火温度达到 600℃,肖特基金属出现了起泡现象,如图 8 所示. 在温度低于 600℃ 时退火的金属形貌与未退火材料相近,未发现金属起泡现象. 图 9 为在 500℃ N₂ 气氛中经过 5 min 退火后器件栅形貌.