

SiN 钝化前的 NF₃ 等离子体处理对 AlGa_N/Ga_N HEMT 性能的影响

任春江[†] 陈堂胜 焦 刚 陈 刚 薛舫时 陈 辰

(南京电子器件研究所单片集成电路与模块国家重点实验室, 南京 210016)

摘要: 研究了 SiN 钝化前利用感应耦合等离子体(ICP)对 AlGa_N/Ga_N HEMT 表面进行 NF₃ 等离子体处理对器件性能的影响. 结果表明, 运用低能量的 NF₃ 等离子体处理钝化前的 AlGa_N/Ga_N HEMT 表面能有效抑制器件电流崩塌, 而器件直流及微波小信号特性则未受影响. 微波功率测试表明, 经过 6min NF₃ 等离子体处理的 AlGa_N/Ga_N HEMT 在 2GHz, 30V 工作电压下达到 6.15W/mm 的输出功率密度, 而未经过处理的器件只达到 1.82W/mm 的输出功率密度.

关键词: AlGa_N/Ga_N; 高电子迁移率晶体管; 电流崩塌; NF₃ 等离子体处理

PACC: 5275R **EEACC:** 2550E

中图分类号: TN325.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)12-2385-04

1 引言

AlGa_N/Ga_N HEMT 作为第三代宽禁带化合物半导体器件, 其在高频、大功率应用方面的优势已得到充分展示, X 波段输出功率密度达 30W/mm 的小栅宽器件已被研制成功^[1], 大栅宽器件的连续波输出功率则可达 150W 以上^[2,3]. AlGa_N/Ga_N HEMT 的可靠性也获得了提高, 研究表明 3dB 过驱动下, 器件可有效工作 20 年以上^[3], 完全符合实用要求, 但要使器件批量应用, 依然还有许多障碍需要克服, 器件电流崩塌就是其中之一.

AlGa_N/Ga_N HEMT 沟道中热电子受强电场激发隧穿进入器件表面并被表面电子陷阱捕获, 被捕获的电子在器件表面形成虚栅耗尽了沟道中的二维电子气, 使得器件出现电流崩塌. 对 AlGa_N/Ga_N HEMT 的电流崩塌, 工艺上可采用 SiN 钝化加以抑制^[4], SiN 钝化可有效降低器件表面态密度^[5]. 除了 SiN 钝化, 采用适当表面处理技术也可对 AlGa_N/Ga_N HEMT 的电流崩塌加以抑制. Edwards 等人^[6]在 SiN 钝化介质生长前用 NH₃ 等离子体对 AlGa_N/Ga_N HEMT 表面进行了处理, 结果表明 NH₃ 等离子体处理不仅改善了器件电流崩塌的情况, 并且提高了器件可靠性, Hoshi 等人^[7]的进一步研究表明 NH₃ 等离子体处理可以有效去除器件表面的碳沾污物, 这些碳沾污物以碳氢化合物的形式存在, 通过去除这些沾污物可改善器件电流崩塌. Hasegawa 等人^[8]的研究结果显示, 采用 N₂ 等离子体处理 AlGa_N/Ga_N HEMT 表面也可以改善器件电流崩塌. 进一步的研究表明, N₂ 等离子体处理后器件表面 III 族与 V 族元素比例相比处理前更趋近于 1, 因而他们认为 N₂ 等离子体处理减少了表面的氮空位, 相应地降低了由氮

空位所引入的深能级密度.

本文在 AlGa_N/Ga_N HEMT 的 SiN 钝化介质生长前, 利用 ICP 产生的 NF₃ 等离子体对器件表面进行了处理, 结果表明 NF₃ 等离子体处理对器件电流崩塌起到了有效的抑制作用, 而直流及微波小信号特性则未受影响, 最终改善了器件的微波功率特性.

2 器件结构与工艺

研究中采用了 MOCVD 技术生长在半绝缘 SiC 衬底上的 AlGa_N/Ga_N 异质结材料, 其结构如图 1 所示, 包括 2μm 的 Ga_N 缓冲层、1nm 的 AlN 隔离层、20nm 非掺杂的 AlGa_N 势垒层及其上 5nm 的 Ga_N 帽层.

AlGa_N/Ga_N HEMT 研制中首先进行的是欧姆接触制作, 采用 Ti/Al/Ni/Au 多层金属系统并在 850°C 的 N₂ 气氛中快速热退火 30s 后获得了 0.6Ω·mm 的接触电阻, 接着利用离子注入隔离技术实现了器件有源区的隔离, 肖特基栅采用了 Ni/Au, 器件栅长为 1μm、栅宽 200μm, 之后利用 PECVD 技术生长 100nm 的 SiN 薄膜对器件进行钝化, 最后利用 RIE 刻蚀出各个电极并用 Ti/Au 进行加厚, 以方便测试.

器件生长 SiN 钝化介质前进行的 NF₃ 等离子体处理在 ICP 设备中进行, 处理时 ICP 上电极加射频功率

i-GaN cap layer 5nm
i-Al _{0.25} Ga _{0.75} N 20nm
AlN 1nm
GaN buffer layer 2μm
SI-SiC substrate

图 1 AlGa_N/Ga_N 异质结示意图

Fig. 1 Schematic illustration of AlGa_N/Ga_N heterostructure

[†] 通信作者. Email: rencj@tom.com

2008-06-11 收到, 2008-07-17 定稿

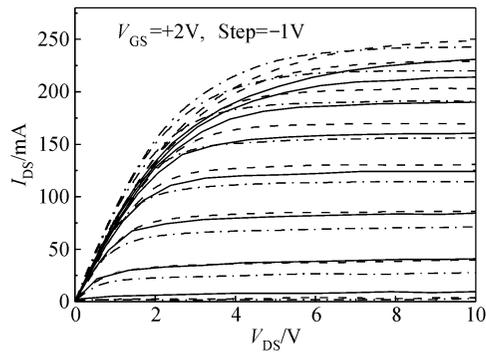


图 2 200 μm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 的直流测试结果 实线为未进行 NF_3 等离子体处理,虚线为经过 3min NF_3 等离子体处理,点划线为经过 6min NF_3 等离子体处理.

Fig. 2 DC performance of the AlGaIn/GaN HEMTs with 200 μm gate width Solid lines for devices without NF_3 plasma treatment, dash lines for devices with 3min NF_3 plasma treatment, and dash dot lines for devices with 6min NF_3 plasma treatment.

而下电极则不加功率,以减少离子轰击可能对器件表面产生的损伤,处理中所用条件如下:上电极功率 35W,下电极功率 0W, NF_3 气体流量 50sccm.处理结束后,将片子取出立即放入 PECVD 设备中进行 SiN 钝化介质的生长.为进行比较,实验中制作的 AlGaIn/GaN HEMT 还包含了钝化前未用 NF_3 等离子体进行处理的器件,同时为了具有可比性,所有器件采用的材料都来自于同一外延片.

3 结果与讨论

图 2 比较了经过不同时间 NF_3 等离子体处理的 200 μm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 的直流特性.图中未进行 NF_3 等离子体处理器件的饱和电流 I_{DSS} 、最大电流 I_{max} ($V_{\text{GS}} = +2\text{V}$)以及膝处电压 V_{knee} 分别为 190mA, 230mA 和 5.0V,经过 3min NF_3 等离子体处理器件的 I_{DSS} , I_{max} 和 V_{knee} 分别为 203mA, 248mA 和 4.8V,而 6min NF_3 等离子体处理器件的 I_{DSS} , I_{max} 和 V_{knee} 分别为 191mA, 242mA 和 3.9V,这一结果表明 NF_3 等离子体处理未对器件直流特性产生负面影响,相反还在一定程度上改善了器件的膝处电压.图3所示为图2中 Al-

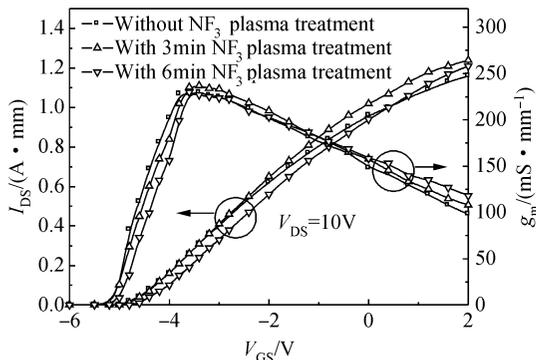


图 3 AlGaIn/GaN HEMT 转移特性

Fig. 3 Transfer characteristics of the AlGaIn/GaN HEMTs

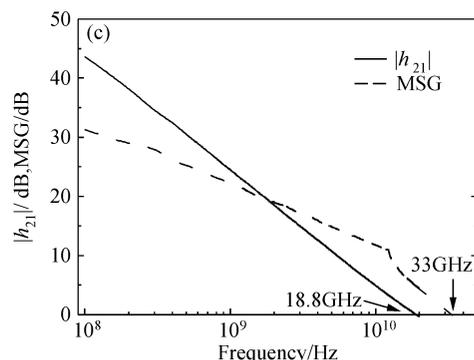
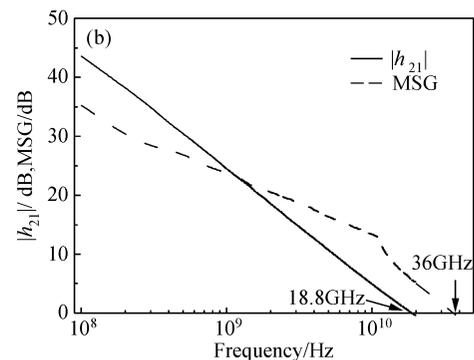
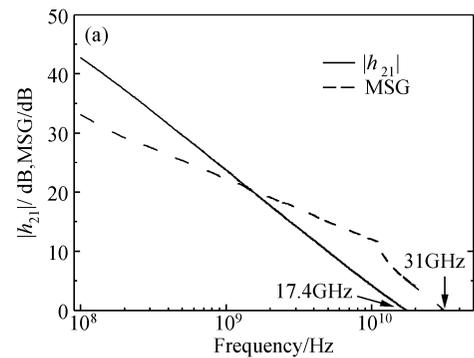


图 4 AlGaIn/GaN HEMT 的微波小信号特性 (a) 未进行 NF_3 等离子体处理;(b) 3min NF_3 等离子体处理;(c) 6min NF_3 等离子体处理

Fig. 4 Small RF signal characteristics for the AlGaIn/GaN HEMT (a) Without NF_3 plasma treatment;(b) With 3min NF_3 plasma treatment;(c) With 6min NF_3 plasma treatment

GaN/GaN HEMT 的转移特性.未进行 NF_3 等离子体处理、3 和 6min NF_3 等离子体处理器件的阈值电压分别为 -4.75, -4.67 和 -4.47V;3min 和 6min NF_3 等离子体处理后器件的阈值电压相比于未进行处理的器件分别只有 0.08 和 0.28V 的差异,表明 NF_3 等离子体处理未对器件阈值电压产生明显的影响.

图 4 所示为图 2 中器件的正向电流增益 $|h_{21}|$ 和最大稳定功率增益 MSG 与频率的关系,测试中直流静态偏置点 ($V_{\text{GS}}, V_{\text{DS}}$) = (-3V, 10V).器件未进行 NF_3 等离子体处理的 f_{T} 和 f_{max} 分别为 17.4 和 31GHz,处理 3min 的 f_{T} 和 f_{max} 分别为 18.8 和 36GHz,处理 6min 的 f_{T} 和 f_{max} 分别为 18.8 和 33GHz,几种器件的 $f_{\text{T}}, f_{\text{max}}$ 相接近,表明 NF_3 等离子体处理对器件的微波小信号特性也未造成影响.

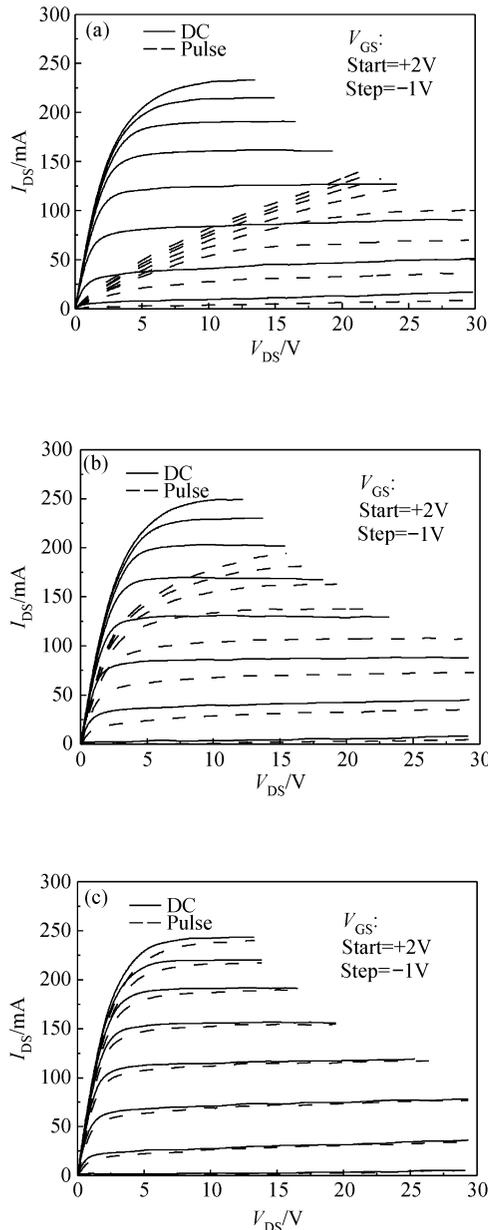


图 5 200 μm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 的脉冲与直流测试结果 (a) 未进行 NF_3 等离子体处理; (b) 3min NF_3 等离子体处理; (c) 6min NF_3 等离子体处理

Fig. 5 Pulse and DC characteristics comparison of a 200 μm gate width AlGaIn/GaN HEMT (a) Without NF_3 plasma treatment; (b) With 3min NF_3 plasma treatment; (c) With 6min NF_3 plasma treatment

NF_3 等离子体处理未对器件直流及微波小信号特性产生不利影响,是由于实验中采用的 NF_3 等离子体能量非常低,减小了等离子体对异质结材料晶格轰击造成的损伤.当然等离子体未对晶格造成损伤并不表示其对器件表面也不产生影响,由于器件电流崩塌与表面状态密切相关,器件表面状态的改变也必将影响器件的电流崩塌.为研究 NF_3 等离子体处理对器件电流崩塌的影响,对研制的器件利用 Accent 公司 DIVA 系列的 D265 脉冲测试仪进行了脉冲特性测试.脉冲测试时器件栅上静态偏置电压 $V_{\text{GS}} = -6\text{V}$,使器件处于夹断状

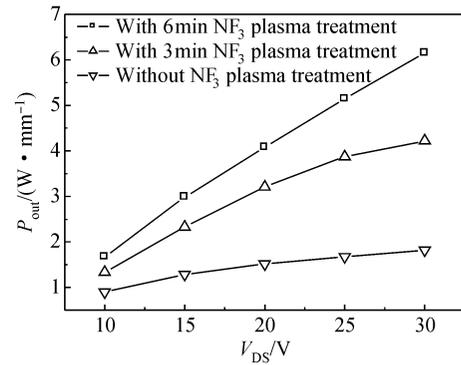


图 6 200 μm 栅宽 AlGaIn/GaN HEMT 在 2GHz 时输出功率密度与工作电压的关系

Fig. 6 Operation voltage dependence of output power density of 200 μm gate width AlGaIn/GaN HEMTs at 2GHz

态,避免自热效应的影响;源、漏间静态偏置电压 $V_{\text{DS}} = 20\text{V}$,以便在器件栅与漏之间沟道中建立一个强电场,使沟道中的电子获得能量进入器件表面态.脉冲测试中所用的脉冲宽度为 200ns,信号的占空比为 0.04%,在这样的测试条件下,器件产生的热量是非常微量的,测试中器件结温可认为是恒定的.

图 5 为脉冲测试得到的结果,其中图 5(a)中器件未用 NF_3 等离子体进行处理,图 5(b)中器件在钝化前利用 NF_3 等离子体进行了 3min 的处理,而图 5(c)中器件在钝化前进行了 6min 的 NF_3 等离子体处理.未进行 NF_3 等离子体处理的器件表现了非常严重的电流崩塌,而进行了 3min 处理后,器件电流崩塌明显得到改善,6min 处理则基本上消除了器件的电流崩塌,这一结果表明 SiN 钝化前的 NF_3 等离子体处理能够有效抑制器件电流崩塌.

对于 NF_3 等离子体处理抑制 AlGaIn/GaN HEMT 电流崩塌一个可能的原因是同 N_2 等离子处理^[9]一样,由于等离子体中含有的 N 原子填补了器件表面的氮空位,器件欧姆接触制作中的高温退火过程^[9]或者将器件暴露于空气^[8]都有可能在 AlGaIn/GaN HEMT 的表面引入氮空位,氮空位的填补降低了由其所引入的表面态密度,从而改善了器件的电流崩塌. NF_3 等离子体处理抑制器件电流崩塌的另一个可能的原因则是由于去除了器件表面的有机沾污物,AlGaIn/GaN HEMT 表面可能存在的有机沾污物将改变器件的表面状态,从而恶化其电流崩塌^[8],而 NF_3 等离子体中含有的氟离子具有很强的活性,可以有效去除器件表面的有机物质,从而改善器件电流崩塌.事实上很有可能是上述两个原因一起作用,最终改善了器件的表面状态,从而抑制了 AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌.

对研制的 AlGaIn/GaN HEMT 在不同工作电压下通过负载-牵引测试得到的单位栅宽输出功率密度如图 6 所示,测试中输入的连续波信号频率为 2GHz.图中经过 6min NF_3 等离子体处理的器件在 30V 时饱和输出功率密度达到了 6.15W/mm,经过 3min NF_3 等离子体处理的器件在 30V 时饱和输出功率密度也达到了

4.22W/mm,而未经过 NF_3 等离子体处理的器件在 30V 时的饱和输出功率密度只有 1.82W/mm.

4 结论

本文提出了一种 SiN 钝化前对利用 ICP 对 AlGaIn/GaN HEMT 进行 NF_3 等离子体处理以改善器件电流崩塌的方法.该方法的关键是采用了低能量的 NF_3 等离子体,减小了等离子体轰击对晶格的损伤,从而对器件直流、微波小信号的影响降到了最低.实验结果表明 3min 的 NF_3 等离子体处理即可明显改善器件电流崩塌,而 6min 的 NF_3 等离子体处理使得器件电流崩塌基本得到消除.2GHz 下的微波功率测试表明,30V 工作电压时,未经过 NF_3 等离子体处理的 AlGaIn/GaN HEMT 只有 1.82W/mm 的输出功率密度,而经过 3min NF_3 等离子体处理的器件输出功率密度达到了 4.22W/mm,6min NF_3 等离子体处理的器件则达到了 6.15W/mm 的最高输出功率密度.

参考文献

- [1] Wu Y F, Saxler A, Moore M, et al. 30-W/mm GaN HEMTs by field plate optimization. *IEEE Electron Device Lett*, 2004, 25(3): 117
- [2] Kanamura M, Kikkawa T, Iwai T, et al. An over 100W n-GaN/n-AlGaIn/GaN MIS-HEMT power amplifier for wireless base station applications. *IEEE IEDM Tech Digest*, 2005: 572
- [3] Nagy W, Singhal S, Borges R. 150W GaN-on-Si RF power transistor. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2005: 483
- [4] Green B M, Chu K K, Chumbes E M, et al. The effect of surface passivation on the microwave characteristics of undoped AlGaIn/GaN HEMTs. *IEEE Electron Device Lett*, 2000, 21(6): 268
- [5] Vertiatchikh A, Eastman L F, Schaff W J, et al. Effect of the surface passivation of the AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistor. *Electron Lett*, 2002, 38(8): 388
- [6] Edwards A P, Mittereder J A, Binari S C, et al. Improved reliability of AlGaIn-GaN HEMTs using an NH_3 plasma treatment prior to SiN passivation. *IEEE Electron Device Lett*, 2005, 26(4): 225
- [7] Hoshi S, Marui T, Itoh M, et al. Influence of NH_3 -plasma pretreatment before SiN_3 passivation film deposition on current collapse in AlGaIn/GaN HEMT. *IEICE Trans Electron*, 2006, E89-C(7): 1052
- [8] Hideki H, Takanori I, Shinya O, et al. Mechanisms of current collapse and gate leakage currents in AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistors. *J Vac Sci Technol B*, 2003, 21(4): 18445
- [9] Ruvimov S, Liliental-Weber Z, Washburn J, et al. Microstructure of Ti/Al ohmic contacts for n- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(18): 2582

Effects of NF_3 Plasma Treatment Prior to SiN Passivation on the Characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs

Ren Chunjiang[†], Chen Tangsheng, Jiao Gang, Chen Gang, Xue Fangshi, and Chen Chen

(National Key Laboratory of Monolithic Integrated Circuits and Modules, Nanjing Electron Devices Institute, Nanjing 210016, China)

Abstract: NF_3 plasma surface treatment in inductively coupled plasma (ICP) system prior to SiN passivation on the characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs has been studied. The results show that current collapse is effectively suppressed while DC and RF performance is not affected for the AlGaIn/GaN HEMTs with low power NF_3 plasma treated. The AlGaIn/GaN HEMT with 6 minutes NF_3 plasma treated reaches a power density of 6.15W/mm at 2GHz and 30V operating voltage while the device without NF_3 plasma treated only gets an output power density of 1.82W/mm.

Key words: AlGaIn/GaN; HEMT; current collapse; NF_3 plasma treatment

PACC: 5275R **EEACC:** 2550E

Article ID: 0253-4177(2008)12-2385-04

[†] Corresponding author. Email: rencj@tom.com

Received 11 June 2008, revised manuscript received 17 July 2008