

具有低欧姆接触电阻的高性能 AlGaIn/GaN HEMT 器件研制*

刘 键[†] 李诚瞻 魏 珂 和致经 刘果果 郑英奎 刘新宇 吴德馨

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 研究了 AlGaIn/GaN HEMT 器件 Ti/Al/Ti/Au 四层金属结构欧姆接触的形成过程. 通过系统研究退火条件获得了较低的欧姆接触电阻, 实现了 $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的欧姆接触率, 并在此基础上对 AlGaIn/GaN HEMT 欧姆接触形成机理进行了深入讨论. 通过器件工艺的优化, 研制了高性能的 AlGaIn/GaN HEMT 器件. 栅宽 $40 \mu\text{m}$ 的器件跨导达到 250mS/mm , f_T 达到 70GHz ; 栅宽 0.8mm 的功率器件电流密度达到 1.07A/mm ($V_g = 0.5 \text{V}$), $V_{ds} = 30 \text{V}$ 时, 8GHz 工作频率下 (在片测试) 器件的输出功率为 32.5dBm (1.6W), 输出功率密度达到 2.14W/mm , 功率增益为 12.7dB .

关键词: AlGaIn/GaN HEMT; 欧姆接触; 跨导; 输出功率密度

EEACC: 2570

中图分类号: TN325+.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)S0-0262-04

1 引言

新一代化合物半导体 GaN 具有优越的材料性能, 十分适合制造高频大功率器件, 其器件和电路在军用和民用领域有广泛的应用前景. 由于 GaN 异质结特有的二维尺度上的大电子气密度, GaN 基 HEMTs 具有十分优越的微波功率和噪声特性, 大功率高频低噪声 GaN AlGaIn/GaN 器件和电路在军用和民用领域有广泛的应用前景^[1~3]. 目前, AlGaIn/GaN HEMT 已经成为研究的重点和热点. 低欧姆接触电阻对实现优良的器件电学特性, 例如高跨导和高饱和电流, 起着至关重要的作用^[4,5]. 由于 GaN 的带隙较宽, 实现低电阻欧姆接触相对比较困难. 许多实验表明, Ti/Al/Ti/Au, Ti/Al/Pt/Au 等多层金属结构能够在 n-或 i-AlGaIn 上实现较低电阻的欧姆接触^[5,6]. 从已报道的研究结果看: 采用多元合金层或者多元金属层可以获得较低的欧姆接触电阻, 但实验结果差异较大, 难以获得稳定可靠的欧姆接触条件. 从接触界面固相反应分析欧姆接触形成过程, 说明合金温度、合金时间对接触界面反应过程有较大的影响, 表明欧姆接触特性与合金温度、时间以及 AlGaIn 势垒层的厚度有密切的关系.

本文通过系统研究退火条件, 获得了较低的欧

姆接触电阻, 实现了 $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的欧姆接触率, 在此基础上对 AlGaIn/GaN HEMT 欧姆接触形成的机理进行了深入讨论. 通过器件工艺的优化, 获得高性能的 AlGaIn/GaN HEMT 器件. 栅宽 $40 \mu\text{m}$ 的器件跨导达到 250mS/mm , f_T 达到 70GHz ; 栅宽 0.8mm 的功率器件电流密度达到 1.07A/mm ($V_g = 0.5 \text{V}$), $V_{ds} = 30 \text{V}$ 时, 8GHz 工作频率下 (在片测试) 器件的输出功率为 32.5dBm (1.6W), 输出功率密度达到 2.14W/mm , 功率增益为 12.7dB .

2 实验

实验采用中国科学院半导体研究所和中国科学院物理研究所提供的 50mm AlGaIn/GaN 外延材料, 材料采用金属有机物化学气相淀积 (MOCVD) 技术制备. 在衬底为 (0001) 面的蓝宝石上生长 $3.5 \mu\text{m}$ 的 GaN 缓冲层. 势垒层为 24nm 非掺杂 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 结构, 其中 Al 组分 $x = 15\%$. 霍尔测量得出室温下二维电子气的浓度为 $1.3 \times 10^{13} / \text{cm}^2$, 迁移率为 $1120 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$. 材料均匀性误差 $< 5\%$.

退火实验采用相同的工艺, 源漏金属采用 Ti (15nm)/Al (150nm)/Ti (70nm)/Au (100nm) 四层金属结构, 在同样的气氛下进行快速退火 (RTA). 具体的过程是: 将均匀 (方阻均匀性 $< 5\%$) 完整的

* 国家自然科学基金委员会与香港研究资助局联合科研基金 (批准号: 60418011), 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 (批准号: KG CX2-SW-107) 资助项目

[†] 通信作者. Email: liuj_12222@yahoo.com

2005-10-11 收到, 2006-01-06 定稿

50mm 晶圆分割成多个小片,进行欧姆接触实验.一部分实验固定退火时间 20s,改变退火温度;另一部分实验设定退火温度为 780℃,改变退火时间.为保证退火温度的稳定性和一致性,所有退火工艺在退火炉同一位置进行.

AlGaIn/GaN HEMT 工艺流程:利用 ICP 干法刻蚀实现器件隔离,源漏金属采用 Ti/Al/Ti/Au 四层金属结构.随后在高纯的 N₂ 气氛下通过 RHT600M 快速退火炉退火形成欧姆接触.采用 Ni (30nm)/Au (200nm) 制备金属栅.最后采用 Ti (30nm)/Au(4000nm)实现一次布线,完成器件基本工艺流程.使用 HP4155 半导体特性测试仪进行欧姆接触特性测量,用 HP8510C 网络分析仪和 CASCADE 探针台测试 AlGaIn/GaN HEMT 器件单管的高频特性,采用 Focus Load-Pull 系统在片测试器件功率.

3 结果与讨论

对 AlGaIn/GaN HEMT 器件总体工艺而言,欧姆接触工艺的研究对器件的最终性能有十分重要的影响.实验中将材料特性均匀的 50mm 晶圆分割成多个小片,使用不同退火条件进行欧姆接触退火实验.部分实验固定退火时间为 20s,改变退火温度;另一部分实验设定退火温度为 780℃,改变退火时间.通过 HP4155 半导体特性测试仪进行 $I-V$ 特性测试,测试结果如图 1 所示.

从图 1(a)看出,在固定退火时间 20s,合金温度为 795℃ 时, $I-V$ 特性曲线斜率最大,即欧姆接触电阻最小,升高或降低温度都会减小曲线斜率,即增大接触电阻.同样从图 1(b)看出,在退火温度为 780℃,退火时间 20s 时 $I-V$ 特性曲线斜率最大,退火时间增加和减少都将减小曲线斜率,即增大接触电阻.由此,我们得出结论:在一定的源漏金属条件下,必须选择合适的退火时间和温度才能获得最低的欧姆接触电阻.

一般认为:Ti/Al/Ti/Au 与 AlGaIn 形成欧姆接触过程中,金属 Al, Ti 将与 AlGaIn 层发生反应,AlGaIn 中 N 元素向金属层扩散,产生大量的 N 空位,从而形成重掺杂的半导体,同时金属将向 AlGaIn 层扩散^[7].不同的合金温度和条件,金属与 AlGaIn 发生反应程度不一样,N 空位引起的掺杂浓度以及金属向 AlGaIn 层的扩散深度都不相同^[7,8],从而影响接触电阻.

根据以上解释和实验结果,可以认为:当合金温度较低时,Al, Ti 与 AlGaIn 反应相对不充分,形成的 N 空位浓度不高,金属向 AlGaIn 扩散的深度较浅,合金对 AlGaIn 势垒层晶格破坏程度不大,具有

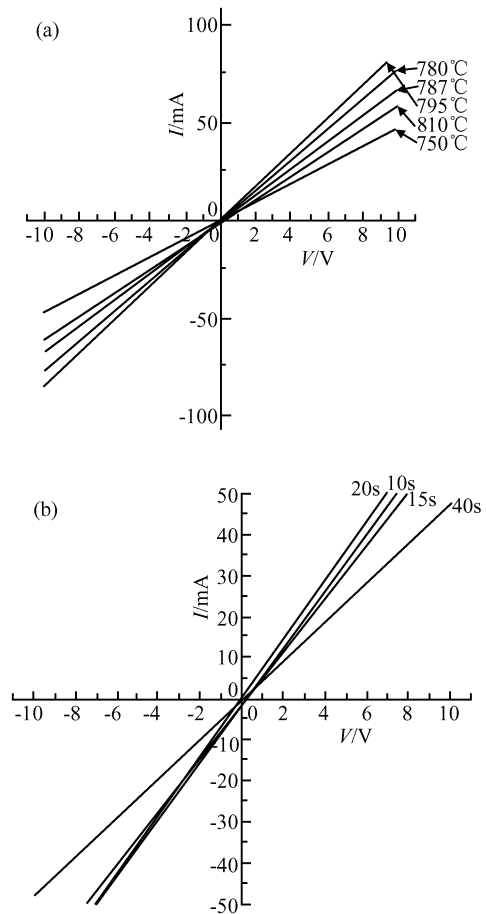


图 1 不同合金条件下 $I-V$ 曲线 (a)不同合金温度的 $I-V$ 曲线(合金时间为 20s);(b)不同合金时间的 $I-V$ 曲线(合金温度为 780℃)

Fig.1 $I-V$ characteristics under varied annealing conditions

完整晶格 AlGaIn 层厚度仍能保持原有的 2DEG 浓度,这时金属与 AlGaIn 之间还存在势垒,没有完全形成欧姆接触,接触电阻较大.随着合金温度的升高或合金时间的加长,金属向 AlGaIn 层扩散深度加大,Al, Ti 与 AlGaIn 反应程度加深,N 空位引入的掺杂浓度增大,形成比较好的欧姆接触^[7].随着退火温度的进一步上升或退火时间的延长,金属向 AlGaIn 层的深度扩散破坏了 AlGaIn 层晶格完整性.当合金温度超过一定温度(在实验中 795℃)时,AlGaIn 晶格结构的破坏将影响压电极化和自发极化效应,从而影响源漏区下方 2DEG 浓度,表现出电流降低,因而出现 $I-V$ 特性曲线斜率下降.

通过以上分析我们认为:对于 AlGaIn/GaN HEMT 来说,在欧姆接触形成的过程中,AlGaIn 层不能完全被破坏,既要降低金属半导体接触势垒,又要尽可能保持源漏区下方 2DEG 浓度.因此,从实际应用的角度出发,必须选择合适的欧姆接触工艺(欧姆接触金属)条件,通过工艺优化获得最佳的器

件性能. 在本实验中通过系统改变退火条件获得了较低的欧姆接触电阻, 根据传输线模型及其测试, 我们获得了 $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的欧姆接触率.

在深入研究各种工艺实验和综合优化各项器件工艺的基础上, 我们研制出了 $0.2 \mu\text{m}$ 栅长的 HEMT 功率器件, 其主要结果为: 栅宽 $40 \mu\text{m}$ 的器件跨导达到 250mS/mm (图 2), f_T 达到 70GHz (图 3); 栅宽 0.8mm 的功率器件电流密度达到 1.07A/mm ($V_g = 0.5 \text{V}$) (图 4), 采用 Focus Load-Pull 系统在片测试, $V_{ds} = 30 \text{V}$ 时, 8GHz 工作频率下的器件输出功率为 32.5dBm (1.6W), 输出功率密度达到 2.14W/mm , 功率增益为 12.7dB (图 5). 根据我们的工艺实验和多次流片经验, 我们认为对于 AlGaIn/GaN HEMT, 器件制造工艺对器件性能指标有十分重要的影响. 尽管获得了相当不错的器件性能, 但各项工艺仍有进一步改善和优化的潜力.

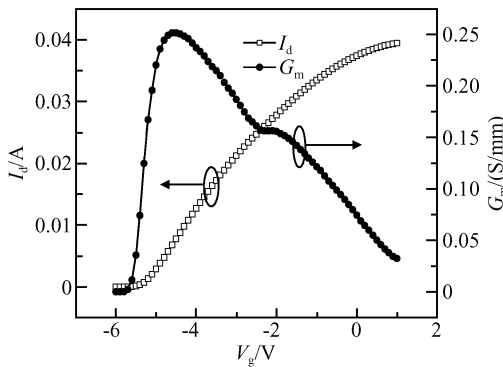


图 2 栅宽 $40 \mu\text{m}$ 器件转移特性

Fig. 2 DC transfer characteristics of $40 \mu\text{m}$ gate width device

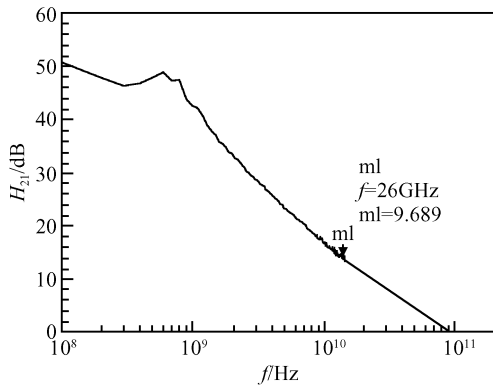


图 3 栅宽 $40 \mu\text{m}$ 器件高频特性

Fig. 3 DC high frequency characteristics of $40 \mu\text{m}$ gate width device

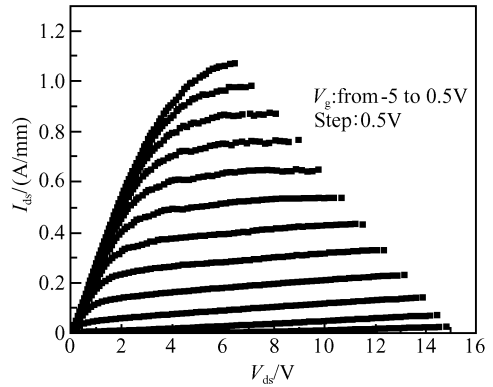


图 4 栅宽 0.8mm 功率器件输出特性

Fig. 4 DC $I_{ds} - V_{ds}$ characteristics of 0.8mm gate width power device

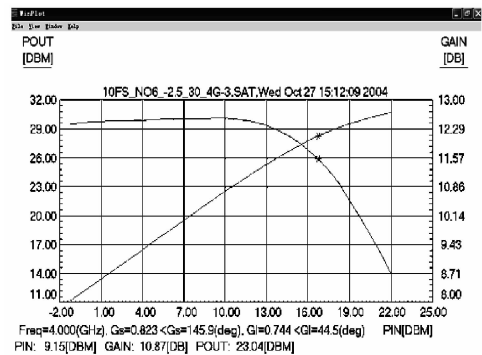


图 5 栅宽 0.8mm 功率器件的功率特性

Fig. 5 Output power characteristics of 0.8mm gate width power device

4 结 论

通过系统改变退火条件获得了较低的欧姆接触电阻, 实现了 $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的欧姆接触率. 在此基础上系统研究了 AlGaIn/GaN HEMT 器件 Ti/Al/Ti/Au 四层金属结构欧姆接触的形成过程, 对 AlGaIn/GaN HEMT 欧姆接触形成的机理进行了深入讨论. 在 AlGaIn/GaN HEMT 欧姆接触形成的过程中 AlGaIn 层不能完全被破坏, 既要降低金属半导体接触势垒, 又要尽可能保持源漏区下方 2DEG 浓度.

通过器件工艺的优化, 获得了高性能的 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 栅宽 $40 \mu\text{m}$ 的器件跨导达到 250mS/mm , f_T 达到 70GHz ; 栅宽 0.8mm 的功率器件电流密度达到 1.07A/mm ($V_g = 0.5 \text{V}$), $V_{ds} = 30 \text{V}$ 时, 8GHz 工作频率下 (在片测试) 器件的输出功率为 32.5dBm (1.6W), 输出功率密度达到 2.14W/mm , 功率增益为 12.7dB .

参考文献

- [1] Sheppard S T, Doverspike K, Pribble W L, et al. High-power microwave GaN/AlGaIn HEMTs on semi-insulating silicon carbide substrates. *IEEE Electron Device Lett*, 1999, 20(3): 161
- [2] Keller S, Wu Y F, Parish G, et al. Gallium nitride based high power heterojunction field effect transistors: process development and present status at UCSB. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(3): 552
- [3] Youn D H, Lee J H, Kumar V, et al. The effects of isoelectronic Al doping and process optimization for the fabrication of high-power AlGaIn-GaN HEMTs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2004, 51(5): 785
- [4] Asif Khan M, Shur M S, Chen Q. Hall measurements and contact resistance in doped GaN/AlGaIn heterostructures. *Appl Phys Lett*, 1996, 68: 3022
- [5] Cai S J, Li R, Chen Y L, et al. High performance AlGaIn/GaN HEMT with improved ohmic contact. *Electron Lett*, 1998, 34(11): 2354
- [6] Lu Wu, Kumar V, Piner E L, et al. DC, RF, and microwave noise performance of AlGaIn/GaN field effect transistors dependence of aluminum concentration. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(4): 1069
- [7] Ruvimov S, Liliental-Weber Z, Washburn J, et al. TEM/HREM of Ti/Al and WNi/Ti/Al ohmic contacts for n-AlGaIn. *Proceedings of the 10th Conference of Semiconducting and Insulating Materials (SIMC-X)*, 1998: 247
- [8] Lin Z J, Lu Wu, Lee J, et al. Influence of annealed ohmic contact metals on polarisation of AlGaIn barrier layer. *Electron Lett*, 2003, 39(19): 1412

Development of High Performance AlGaIn/GaN HEMTs with Low Ohmic Contact*

Liu Jian[†], Li Chenzhan, Wei Ke, He Zhijing, Liu Guoguo, Zheng Yingkui, Liu Xinyu, and Wu Dexin

(*Compound Semiconductor Devices & Circuits Laboratory, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: The process of Ti/Al/Ti/Au ohmic contact of AlGaIn/GaN HEMTs were studied systematically. After the study of annealing process, we got the ohmic contact ratio of $10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$. We also analyzed the mechanism of ohmic contact of AlGaIn/GaN HEMTs. Based on the optimization of device fabrication, we developed high performance AlGaIn/GaN HEMTs. The device with 40 μm gate width has reached a maximum extrinsic transconductance of 250 mS/mm, and the current density of the device with 0.8 mm gate width is 1.07 A/mm ($V_g = 0.5 \text{V}$) at $V_{ds} = 30 \text{V}$. The output power of 0.8 mm gate width device is 32.5 dBm (1.6 W) at 8 GHz, the output power density is 2.14 W/mm and power gain 12.7 dB.

Key words: AlGaIn/GaN HEMT; ohmic contact; transconductance; output power density

EEACC: 2570

Article ID: 0253-4177(2006)S0-0262-04

* Project supported by the Joint Research Program of NSFC and RGC (No. 60418011), the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2002CB311903), and the Key Program of Knowledge Innovation Engineering of the Chinese Academy of Sciences (No. KG CX2-SW-107)

[†] Corresponding author. Email: liuj_12222@yahoo.com

Received 11 October 2005, revised manuscript received 6 January 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics