

Research on 1700V High Performance GaN HEMT Power Switching Devices

Xing Chen

Xidian-Wuhu Research Institute, Wuhu, Anhui, 241000, China

Abstract

GaN materials have the advantages of high band-gap width, high electron mobility, high thermal conductivity and good chemical stability. Therefore, GaN based HEMT power electronic devices have the characteristics of high voltage resistance, low loss, high switching speed, high temperature characteristics and good anti-irradiation effect in power switching applications. However, the current GaN devices for power switching applications have not fully played their characteristic advantages, mainly reflected in: at present, the breakdown characteristics of GaN material systems have been fully explored, but the power switching applications based on GaN devices are mainly concentrated in the 100~650 V middle and low voltage level, and the applications in the high-voltage level power switching field are less. To solve this problem, the novel GaN based HEMT power electronic devices for power switching applications are studied in this paper. GaN HEMT devices with lateral breakdown voltage over 1700V and up to 1740V were prepared on silicon substrate.

Keywords

GaN based HEMT power electronic device; 1740V; thin buffer; reduce cost

1700V 高性能 GaN HEMT 电力开关器件研究

陈兴

西安电子科技大学芜湖研究院, 中国 · 安徽 芜湖 241000

摘 要

GaN材料具有高禁带宽度、高电子迁移率、高热导率、较好的化学稳定性等优势,因此GaN基HEMT电力电子器件在功率开关应用中具备高耐压、低损耗、高开关速度、高温特性好、抗辐照效应好等特点,但是目前面向功率开关应用的GaN器件并未完全发挥出其特性优势,主要体现在目前GaN材料体系的击穿特性已得到充分挖掘,但是基于GaN器件的功率开关应用主要集中在100~650 V的中低压级别,在高压级别的功率开关领域应用较少。针对此问题,论文对面向功率开关应用的新型GaN基HEMT电力电子器件展开深入研究。论文在硅衬底上制备出了横向击穿电压超过1700V,高达1740V的GaN HEMT器件。

关键词

GaN基HEMT电力电子器件; 1740V; 薄缓冲; 降低成本

1 引言

电力电子器件是电力电子技术中的核心元器件,随着能源和环境问题的日益突出,研究新型高性能、低损耗电力电子器件是提高电能利用率、节约能源、缓解能源危机的有效途径之一。相对于第一代和第二代半导体材料, GaN 材料具有更大的禁带宽度 (3.42 eV)、更高的临界击穿电场 (3.3 MV/cm) 和电子饱和漂移速度 (2.5×10^7 cm/s), 其化学性能稳定、耐高温、抗辐射,在制备高性能电力电子器件方面极具潜力^[1]。由于自发极化和压电极化的作用,即使在非故

意掺杂的情况下, AlGaIn/GaN 异质结界面处也能形成面密度约 10^{13} cm⁻²、室温迁移率达 1800cm²/v · s 以上的二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG), 这使得该结构不但在制备高温大功率微波器件方面优势显著,而且在制备高性能的高压、低损耗、高速、抗辐射电力开关器件方面也表现出了无可比拟的优势。经过 10 多年的努力,用于微波领域 AlGaIn/GaN HEMT 已趋于成熟,相继有产品问世。近几年,人们将目光转向了基于 AlGaIn/GaN HEMT 结构的高耐压电力开关器件的研究。

GaN 在照明、射频和电力电子等方面取得了巨大的成功。近年来,氮化镓高电子迁移率晶体管 (hemt) 正积极渗透到数据中心、电动汽车 (EV) 和可再生能源等工业和汽车应用市场^[2]。因此,迫切需要 1200~1700V 乃至更高耐压的 GaN 器件。在这项工作中,将在 Si 衬底上展示 1740V

【作者简介】陈兴 (1990-), 男, 中国江西抚州人, 硕士, 工程师, 从事氮化镓MOCVD外延和氮化镓功率器件研制和生产研究。

GaN HEMT。清楚地阐述器件结构和处理流程。

2 器件制备

人们惯常认为 GaN 基功率器件的性能以及可靠性问题与 GaN 外延材料的质量是密切相关的。GaN 基微波功率器

件对器件工艺的要求比较高,而 GaN 基 HEMT 电力电子器件的性能依赖于器件结构的设计以及器件的工艺制备两方面。GaN 基电力电子器件的关键工艺包含表面钝化、台面隔离、欧姆接触和栅金属(肖特基接触)等工艺,详见图 1。接下来论文主要针对这四种工艺进行介绍。



图 1 GaN 基电力电子器件基本工艺流程

在 GaN 基功率器件的制备工艺中,钝化层的生长主要是为了抑制 GaN 基器件的表面态,从而改善器件的动态特性,钝化层的质量是非常重要的。通常在进行钝化的介质层生长前需要用稀盐酸等溶液对芯片进行处理。目前常用的钝化层主要包含 Si_3N_4 、 SiO_2 以及 Al_2O_3 、 HfO 等高 k 介质。其中 Al_2O_3 、 HfO 等高 k 介质主要是通过采用原子层沉积(PEALD)进行生长, Si_3N_4 和 SiO_2 可以通过采用 PECVD 或者 LPCVD 来完成。一般来说 PEALD 和 LPCVD 的生长速度较慢,但是生长的材料的质量较高,PECVD 的生长速度较快。需要注意的是 LPCVD 属于高温生长工艺,其温度通常高达 800°C 以上,该工艺无法应用到先栅工艺中。在论文中,耗尽型器件采用 PECVD 在 300°C 生长 Si_3N_4 材料作为钝化层。

台面隔离是用来隔断同一个外延片上不同器件之间的漏电干扰。目前常用的台面隔离主要分为两种:第一种是采用干法刻蚀结合湿法刻蚀的方式,首先利用反应离子刻蚀(RIE)或者等离子体刻蚀(ICP)进行干法刻蚀,一般刻蚀深度为二维电子气下方 120 nm 左右,保证沟道层中的 2DEG 被隔断并且电子难以绕过台面隔离的凹槽进行漏电。在 GaN 基器件的制备工艺中,采用 C1 基气体($\text{C12}/\text{BCl}_3$)的干法刻蚀,尤其是快速的干法刻蚀很容易在刻蚀的同时引入刻蚀损伤,从而影响器件的性能,所以在干法刻蚀后需要采用四甲基氢氧化铵溶液(TMAH)进行高温水浴,修复刻蚀损伤,降低器件的漏电,也可以采用 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 的高温退火修复干法刻蚀所造成的 GaN 晶格损伤。第二种

常用的台面隔离方式是离子注入。离子注入通常是高能氮粒子轰击到台面区域之外,将 GaN 晶格打坏使得器件隔离^[3]。一般来说利用离子注入来实现台面隔离具有更好的隔离效果以及更低的泄漏电流。

常规 GaN 基 HEMT 器件的源漏电极一般是欧姆接触。欧姆接触工艺包含凹槽刻蚀、金属沉积、剥离(或金属刻蚀)以及快速高温退火(RTA)四个步骤组成。凹槽刻蚀有利于实现低温欧姆接触,即金属剥离完成后通过采用较低的温度即可在金属与 GaN 半导体材料之间实现欧姆接触。金属沉积一般是利用电子束蒸发(E-beam)或者磁控溅射完成,欧姆接触的金属通常采用 Ti 基金属或者 Ta 基金属两个系列,在论文中的欧姆接触是采用 Ti 基金属完成,金属层从下到上依次是 Ti/ $\sim$ /Ni/Au,厚度分别是 20/130/50/45nm。其中金属 Ti 也被称为势垒层金属,Ti 扩散到 GaN 材料中可以形成低功函数的 TiN 且产生大量的氮空位,进而形成欧姆接触。金属 Al 是覆盖层金属,可以起到催化剂的作用,促进 Ti 与 GaN 中的氮元素形成 TiN。Ni 和 Au 属于帽层金属,Ni 可以阻止上层的 Au 向下扩散,Au 可以起到保护的作用,防止下方的金属被氧化。在金属沉积完成后,通过剥离或者金属刻蚀的方式可以形成论文所需要的源漏电极的图形,最后经过快速热处理即可形成欧姆接触。针对 Ti/Al/Ni/Au 合金的欧姆接触工艺,论文中采用的快速热处理的温度是 860°C ,时间是 35s。

GaN 基 HEMT 器件的栅金属通常采用整流接触,即肖特基接触。肖特基接触的工艺步骤主要分为金属沉积和剥

离，不需要经过快速热处理。在论文中，基于常规耗尽型器件的制备时，采用 Ni/Au 合金做为栅金属与 GaN 材料形成肖特基接触。如图 2 所示，源漏接触为欧姆接触，经过了快速热处理，表面会变得凹凸不平，栅极采用肖特基接触，不需要经过快速热处理，所以金属表面较为平整。

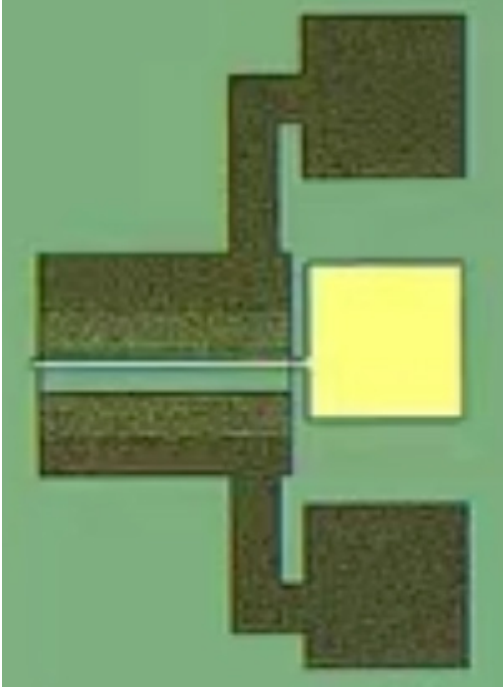


图 2 GaN 基电力电子器件

栅漏间距 $L_{gd}=7\mu\text{m}$ ，栅源间距 $L_{gs}=3\mu\text{m}$ ，栅长 $L_g=6\mu\text{m}$ ，栅宽 $W_g=100\mu\text{m}$ 。

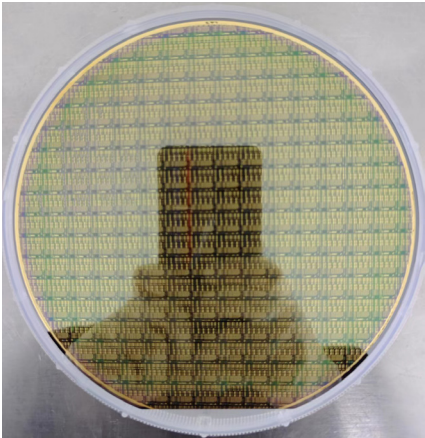


图 3 器件样品图示

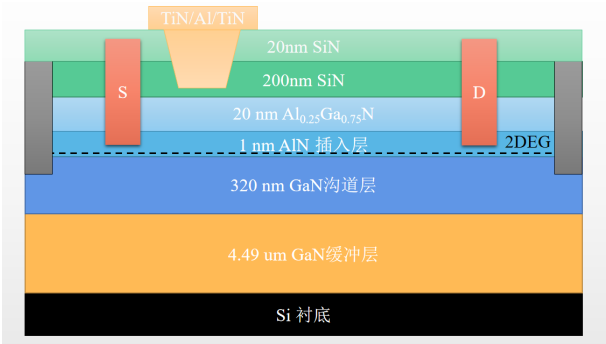


图 4 器件结构示意图

3 器件测试结果及分析

本小节主要针对器件进行电学特性的测试工作，并展开性能分析。器件样品如图 3 所示，器件结构如图 4 所示。

图 5 为器件的转移特性和跨导曲线，可以发现制备的 GaN HEMT 器件阈值电压为 -7.6V ，同时该器件具备极低的栅极漏电，为 10^{-13}A/mm 量级。

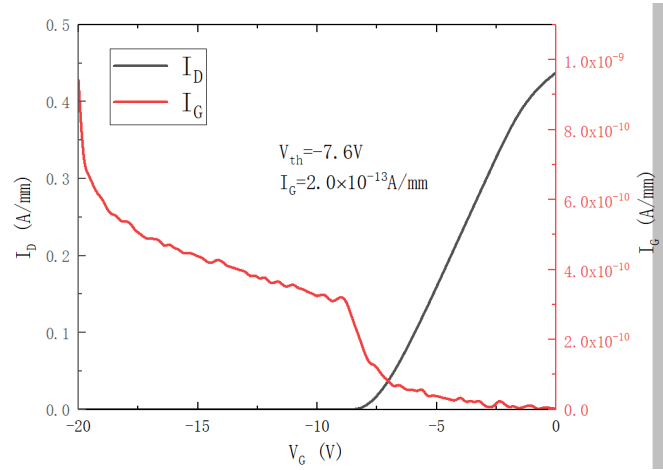


图 5 器件的转移特性曲线以及跨导曲线

根据图6,当栅极电压低于 -7.6V 时,器件处于关闭状态,导致导电沟道被完全堵塞,没有载流子可以进入,从而无法产生电流 I_{DS} 。当栅压 V_{GS} 达到 -7.6V 时,导电沟道逐步打开。经过 B1500 电学特性测试系统测量,发现制备的 GaN

HEMT 电子器件的源漏最大饱和电流密度 $I_{DS}=0.7\text{A/mm}$ 。由直流输出曲线斜率可以算出,制备的 GaN HEMT 器件的 $R_{on}=8.3\text{m}\Omega$ 。

从图 7 中可以看出,制备的 GaN HEMT 器件的击穿电

压高达 1740V，具备良好的耐压特性。

4 结语

论文所制备的高耐压 GaN HEMT 器件，制备出的器件具有良好的电学特性以及可靠性，可以满足多种应用场景

需求。在 $V_{GS}=-7.6V$ 时，制成的 GaN HEMT 器件表现出了良好的电学特性，其源漏最大饱和电流密度 $I_{DS}=0.7A/mm$ ，GaN HEMT 器件的导通电阻 R_{on} 低至 $8.3m\Omega$ 。栅极漏电低至 $10^{-13}A/mm$ 数量级，击穿电压高达 1740V。

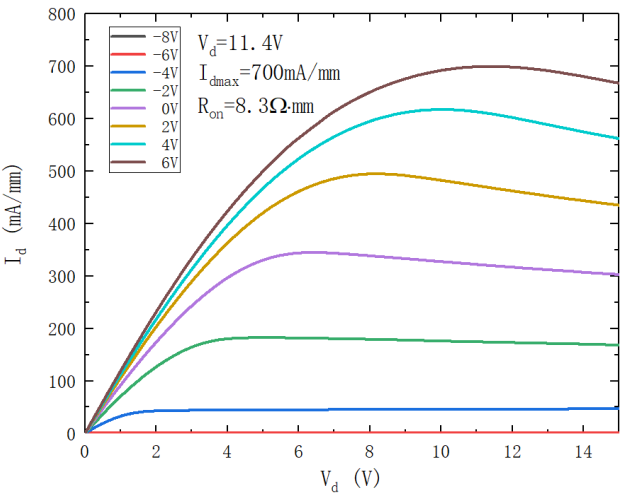


图 6 器件的直流输出特性曲线

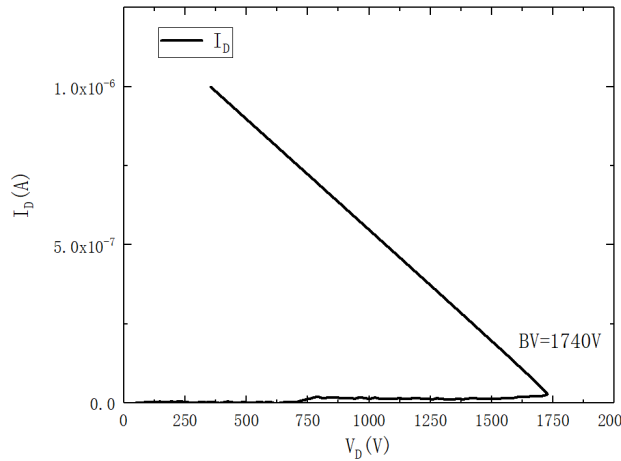


图 7 器件的击穿特性曲线

参考文献

[1] Sharbati S, Ebel T, Franke W T. Design of E-mode GaN HEMTs by the polarization super junction (PSJ) technology[J]. Microelectronics Reliability,2020,114(11):113907.

[2] Ma Y, Xiao M, Du Z, et al. Tri-gate GaN junction HEMT[J]. Applied Physics Letters,2020,117(14):143506.

[3] Gupta G, Kanamura M, Swenson B, et al. 1 200V GaN switches on sapphire substrate[C]. 2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), IEEE,2022:349-352.