

AlGaIn/GaN 双异质结 F 注入增强型高电子迁移率晶体管

王冲 赵梦荻 裴九清 何云龙 李祥东 郑雪峰 毛维 马晓华 张进成 郝跃

Enhancement mode AlGaIn/GaN double heterostructure high electron mobility transistor with F plasma treatment

Wang Chong Zhao Meng-Di Pei Jiu-Qing He Yun-Long Li Xiang-Dong Zheng Xue-Feng Mao Wei Ma Xiao-Hua Zhang Jin-Cheng Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 038501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.038501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

内嵌 CuO 薄膜对并五苯薄膜晶体管性能的改善

Analysis of improved characteristics of pentacene thin-film transistor with an embedded copper oxide layer

物理学报.2015, 64(22): 228502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228502>

溶胶凝胶法制备以 HfO₂ 为绝缘层和 ZITO 为有源层的高迁移率薄膜晶体管

High mobility thin-film transistor with solution-processed hafnium-oxide dielectric and zinc-indium-tin-oxide semiconductor

物理学报.2015, 64(16): 168501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168501>

部分耗尽结构绝缘体上硅器件的低频噪声特性

Low frequency noise behaviors in the partially depleted silicon-on-insulator device

物理学报.2015, 64(10): 108501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.108501>

电离辐射对部分耗尽绝缘体上硅器件低频噪声特性的影响

Radiation effects on the low frequency noise in partially depleted silicon on insulator transistors

物理学报.2015, 64(7): 078501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078501>

电荷失配对 SiC 半超结垂直双扩散金属氧化物半导体场效应管击穿电压的影响

Influence of charge imbalance on breakdown voltage of 4H-SiC semi-superjunction VDMOSFET

物理学报.2014, 63(20): 208501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208501>

AlGa_N/Ga_N双异质结F注入增强型高电子迁移率晶体管*

王冲[†] 赵梦荻 裴九清 何云龙 李祥东 郑雪峰 毛维
马晓华 张进成 郝跃

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071)

(2015年8月10日收到; 2015年11月20日收到修改稿)

理论模拟了不同Ga_N沟道厚度的双异质结(AlGa_N/Ga_N/AlGa_N/Ga_N)材料对高电子迁移率晶体管(HEMT)特性的影响, 并模拟了不同F注入剂量下用该材料制作的增强型器件的特性差异. 采用双异质结材料, 结合F注入工艺成功地研制出了较高正向阈值电压的增强型HEMT器件. 实验研究了三种Ga_N沟道厚度制作的增强型器件直流特性的差异, 与模拟结果进行了对比验证. 采用降低的F注入等离子体功率, 减小了等离子体处理工艺对器件沟道迁移率的损伤, 研制出的器件未经高温退火即实现了较高的跨导和饱和电流特性. 对14 nm Ga_N沟道厚度的器件进行了阈值电压温度稳定性和栅泄漏电流的比较研究, 并且分析了双异质结器件的漏致势垒降低效应.

关键词: 双异质结, 增强型器件, F等离子体, 漏致势垒降低效应

PACS: 85.30.Tv, 73.40.-c, 85.35.Be

DOI: 10.7498/aps.65.038501

1 引言

近年来, 基于AlGa_N/Ga_N异质结的高电子迁移率晶体管(HEMT)在功率器件、微波器件以及Ga_N数字电路等领域得到了良好的发展^[1,2]. 功率器件需要采用增强型器件, Ga_N数字电路也需要增强型器件和耗尽型器件结合组成逻辑电路, 增强型AlGa_N/Ga_N HEMT的研究越来越受到研究者的关注^[3]. 采用槽栅制作增强型AlGa_N/Ga_N HEMT^[4], 由于工艺重复性的问题限制了该技术的发展. 采用在势垒层或栅介质层进行F离子注入成功研制了增强型AlGa_N/Ga_N HEMT^[5,6]. 双异质结结构能提高二维电子气(2DEG)的限域性^[7-9], 有利于实现栅对沟道的控制, 成为制作增强型器件的一种良好的材料结构选择. 本文采用降低功率的F等离子体注入工艺与双异质结材料结构结合, 成

功实现了Ga_N基增强型HEMT. 降低的F离子注入功率和剂量, 一定程度上降低了等离子体损伤和F离子稳定性对器件的影响, 而双异质结构的采用提高了器件的正向阈值电压. 关于双异质结构结合低损伤F处理工艺制作增强型Ga_N器件的研究报道较少, 本文通过模拟和实验研究分析了不同Ga_N沟道厚度对增强型器件特性的影响, 并对研制出的器件进行了高温退火阈值电压稳定性和漏致势垒降低(DIBL)效应研究.

2 实验

双异质结AlGa_N/Ga_N/AlGa_N/Ga_N材料结构是通过低压金属氧化物化学气相沉积设备在(0001)面蓝宝石衬底上异质外延生长得到. 其材料层结构(从衬底向表面)如下: 200 nm高温AlN层; 670 nm未掺杂Ga_N层; 950 nm AlGa_N层, Al

* 国家自然科学基金(批准号: 61574110, 61574112, 61106106)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangchong197810@hotmail.com

组分为7%; 1 nm AlN插入层; GaN沟道层(14 nm, 28 nm, 60 nm); 1 nm AlN插入层; 18 nm AlGaIn势垒层Al组分为32%; 1 nm GaN帽层. 连续生长三片材料, 除了GaN沟道层厚度 d 有三种变化外, 其他层结构相同. 室温Hall效应测试结果显示, 14 nm GaN沟道层材料2DEG浓度为 $8.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 电子迁移率为 $1535 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; 28 nm GaN沟道层材料2DEG浓度为 $1.09 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 电子迁移率为 $1744 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; 60 nm GaN沟道层材料2DEG浓度为 $1.13 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 电子迁移率为 $1806 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

三种不同厚度的GaN沟道层的双异质结材料同时开始工艺流片. 工艺步骤依次为: 反应离子刻蚀(RIE)干法刻蚀形成器件有源区, 刻蚀深度为150 nm, 刻蚀速率为1 nm/s; 源漏欧姆接触均采用Ti/Al/Ni/Au(30 nm/180 nm/40 nm/60 nm)并在830 °C的 N_2 氛围中退火30 s. 在表面淀积60 nm的 Si_3N_4 之后, 用RIE工艺在栅极区域开孔刻蚀去除 Si_3N_4 层成栅场板, 然后对开孔露出的栅区域进行功率为135 W的 CF_4 等离子体处理180 s. 栅金属采用电子束蒸发Ni/Au(30 nm/200 nm)剥离形成栅电极. 设计的器件结构为: 栅宽50 μm , 源漏间距4 μm , 栅长0.5 μm . 器件参数测量采用Keithley4200双脉冲测试仪进行. 材料结构截面图与器件结构如图1所示.

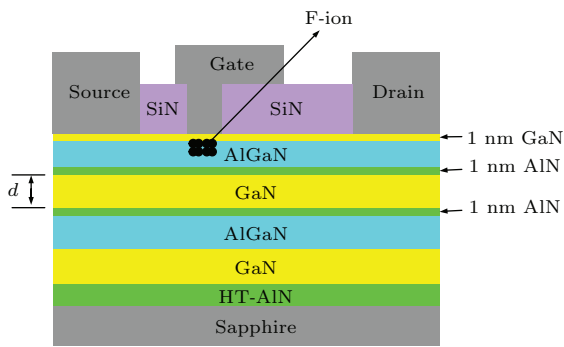


图1 (网刊彩色) 器件结构截面图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of the device structure.

3 结果与讨论

图2所示为通过自洽求解一维薛定谔、泊松方程, 模拟仿真不同GaN沟道层厚度的双异质结器件和传统单异质结器件的能带图. 可以看出, 相对于单异质结器件, 双异质结器件界面处的势阱深度

被提高, 即意味着2DEG浓度的减小^[10]. 双异质结拉高了势阱右侧能带使得2DEG浓度降低, 并且随着GaN沟道层厚度的减小, 势阱深度越小, 2DEG浓度越低. 生长在AlGaIn背势垒层上的GaN沟道层在 a 轴方向上受到来自势垒层的压应力, 成为压应变的GaN层, 该压应变会减弱之后生长的AlGaIn异质结的不匹配度, 从而减弱了异质结的压电效应. GaN沟道层越薄, 其对压电效应减弱的作用越强, 2DEG浓度就会越小. GaN/AlGaIn界面处存在一定量的电子的陷阱, 较厚的GaN沟道能够减弱这种俘获概率, 对2DEG的耗尽作用减弱, 2DEG浓度提高^[11]. 因此, 双异质结的器件2DEG浓度小于传统的单异质结结构, 并且随着GaN层厚度的减小, 2DEG浓度减小.

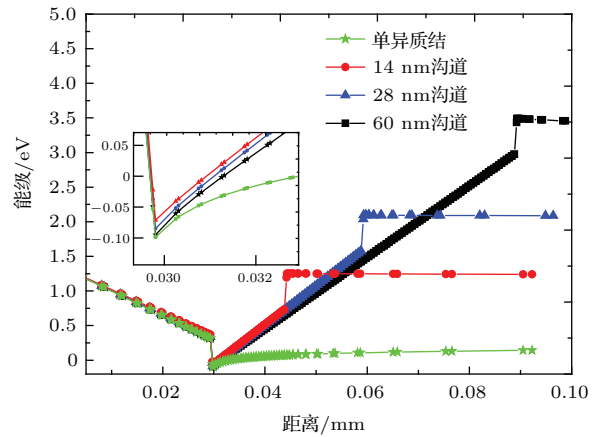


图2 (网刊彩色) 不同GaN沟道厚度器件的能带

Fig. 2. (color online) The energy band diagram of devices with different GaN channel thickness.

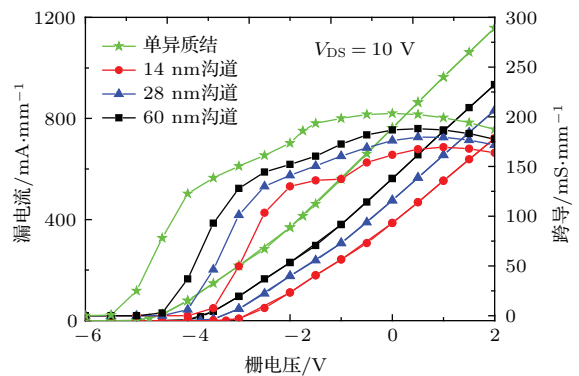


图3 (网刊彩色) 不同GaN沟道厚度器件的转移曲线

Fig. 3. (color online) The transfer curves of devices with different GaN channel thickness.

图3为模拟仿真的不同GaN层厚度的双异质结器件和传统单异质结器件的转移特性. 从图3的模拟结果可见, 单异质结的器件阈值电压

为 -4.6 V, 对于 GaN 沟道层厚度分别为 14, 28, 60 nm 的双异质结器件, 其阈值电压分别为 -3.1 V, -3.5 V, -4.1 V, 不同 GaN 沟道层厚度结构决定的 2DEG 浓度, 进而决定了器件的阈值电压. 从图 3 中还可以看出, 随着 GaN 沟道厚度的减小, 器件峰值跨导下降. 在 GaN/AlGaIn 层的界面处存在合金无序散射对 2 DEG 的迁移率有一定影响, 且 GaN 层厚度越薄, 其减弱作用越强, 因此, 跨导峰值随着 GaN 层厚度的减小而减小.

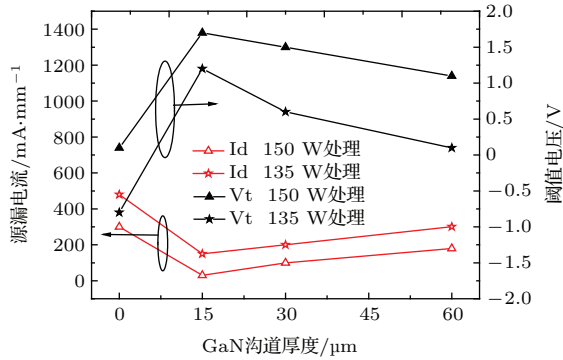


图 4 (网刊彩色) 不同 GaN 沟道厚度器件的阈值和输出饱和电流的关系

Fig. 4. (color online) Dependence of the threshold and drain current on different thickness of GaN channel devices.

双异质结和 F 离子注入都有利于实现增强型的 GaN HEMT 器件. 由于 F 离子在 AlGaIn 势垒层存在温度不稳定性^[12,13], 所以采用双异质结结合 F 离子注入制作增强型器件时, 适当降低 F 离子的注入量能一定程度上减弱 F 离子不稳定性带来的器件稳定性问题. 图 4 所示为对双异质结器件对应 150 W 注入 F 离子浓度 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, 和 135 W 注入 F 离子的浓度 $0.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 两种情况下, 器件饱和电流和阈值电压的特性模拟结果对比, 图中饱和漏电流取栅压为 2 V, 漏压为 10 V 时的最大饱和电流. 150 W 注入 F 离子的模拟条件参照常见的 F 注入增强型器件制作工艺^[5], 而模拟条件在 135 W 的 F 注入剂量相应减少. 对于双异质结的 F 注入增强型器件, 期望器件有较大的正向阈值电压, 同时饱和电流不能过小. 从图 4 的结果可见, 对于 14 nm 的 GaN 沟道厚度器件, 降低 F 离子注入功率使得阈值电压有较小的负向移动, 但饱和电流有较大的增加. 较低的 F 处理功率能降低等离子体对沟道迁移率的影响, 提高器件的跨导和开关特性. 在双异质结结合 F 注入增强型器件中, 需要折中考

虑阈值电压和饱和电流, 实现较高的器件阈值电压的同时, 需要兼顾饱和电流和跨导特性.

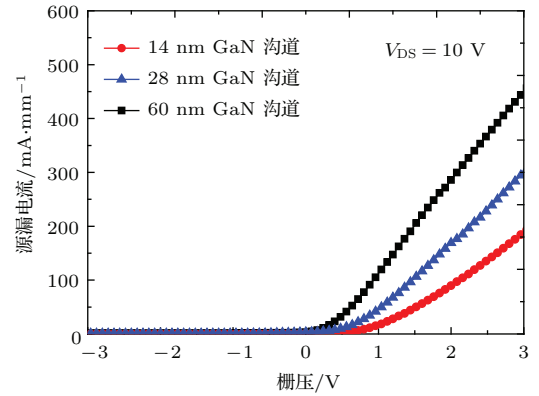


图 5 (网刊彩色) 不同 GaN 沟道厚度器件的转移特性
Fig. 5. (color online) The transfer characteristics of devices with different GaN channel thickness.

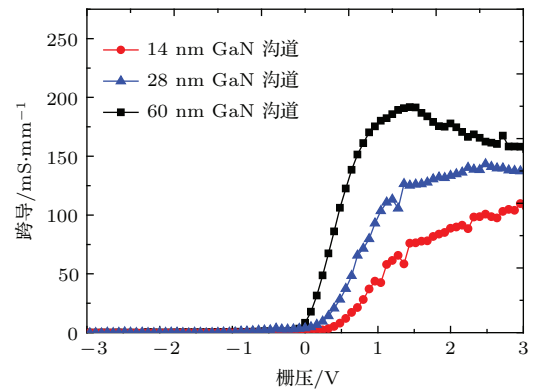


图 6 (网刊彩色) 不同 GaN 沟道厚度器件的跨导特性
Fig. 6. (color online) The transconductance characteristics of devices with different GaN channel thickness.

图 5 和图 6 分别为实验制作的不同 GaN 沟道厚度双异质结材料结合 135 W 功率 F 注入增强型器件的转移特性对比. GaN 沟道厚度为 14 和 28 nm 的器件, 阈值电压分别达到 1.1 和 0.8 V, 成功实现了正向电压较大的增强型器件. 国际常规采用 150 W 等离子体功率制作 F 注入增强型器件, 在 F 注入完毕需要进行高温退火恢复等离子体损伤对沟道迁移率带来的影响. 而本实验降低了 F 等离子体的处理功率, 所研制的器件在未经过退火修复等离子体损伤的情况下, 器件最大跨导分别达到 115 mS/mm 和 137 mS/mm. 由于本实验 F 离子注入功率比常规增强型器件所采用的功率有所降低, 所以等离子体损伤较小, 器件不采用高温退火修复等离子体损伤, 即实现了较好的电流和跨导特性. GaN 沟道厚度为 60 nm 的器件, 由于较厚的 GaN 沟道层减弱了背势垒结构对载流子的限域特性, 因

而器件的阈值电压较更薄 GaN 沟道厚度的器件负方向移动明显. 通过实验测试得到的器件结果与之前的仿真结果进行对比发现, 不同沟道厚度器件得到的阈值电压与模拟结果符合较好, 而器件的饱和电流与模拟结果相比略低. 14 nm 厚 GaN 沟道器件饱和电流与模拟值相差较大, 这与该材料沟 GaN 道厚度较薄引起的迁移率受到界面散射效应增强有关.

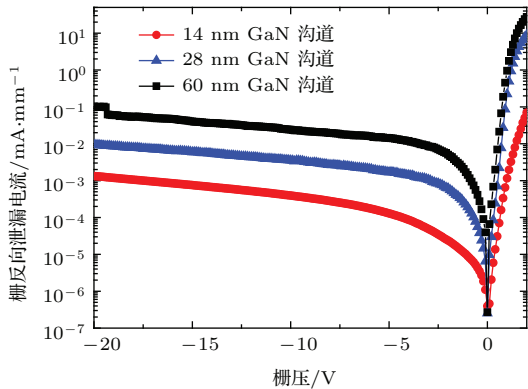


图 7 (网刊彩色) 不同沟道厚度器件栅反向泄漏电流对比
Fig. 7. (color online) The gate reverse leakage current of devices with different GaN channel thickness.

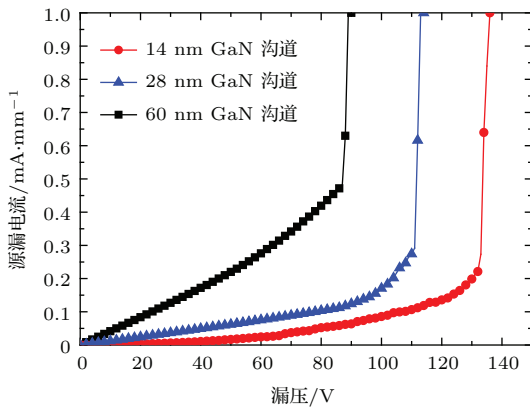


图 8 (网刊彩色) 不同沟道厚度器件击穿电压对比
Fig. 8. (color online) The breakdown voltage of devices with different GaN channel thickness.

图 7 为器件的肖特基特性对比. 可以看到, 栅压偏置在 -20 V 时, 14 nm 的 GaN 沟道厚度器件的肖特基反向电流为 0.001 mA/mm , 28 nm 的 GaN 沟道厚度器件的肖特基反向电流为 0.012 mA/mm , 60 nm 的 GaN 沟道厚度器件的肖特基反向电流为 0.095 mA/mm . 在双异质结材料的 GaN/AlGaIn 界面处具有一些能够俘获二维电子气的陷阱, 较厚的 GaN 沟道层能够减弱耗尽作用, 因此会有更大的垂直电场, 从而引起较大的肖特基反向电流 [11,14]. 图 8 为不同 GaN 沟道厚度器件的击穿特

性对比. 随着 GaN 沟道层厚度的减小, 击穿特性逐渐提高. 器件击穿特性与栅泄漏电流密切相关, 栅泄漏电流是雪崩击穿的诱因.

为了研究 F 注入增强型器件的温度稳定性, 对 GaN 沟道厚度为 14 nm 器件在 $350\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行了 2 min 退火工艺, 退火后器件的转移特性如图 9 所示. 经过退火后, 器件阈值电压由 1.1 V 减小为 0.7 V , 阈值变化量 ΔV_{th} 为 0.4 V . 由于该器件采用了双异质结材料结构, 增加了载流子的限域特性, 并且 AlGaIn 势垒层的厚度也从常规的 20 nm 以上降低到 18 nm, 所以器件工艺中采用较低的 135 W 功率 F 注入即实现了较高正向阈值电压的增强型器件, 这在一定程度上减小了 F 离子的注入量, 同时也降低了 F 离子温度不稳定性对器件阈值电压的影响. 退火后, 器件沟道迁移率得到一定程度的恢复, 饱和电流和最大跨导均有所提高.

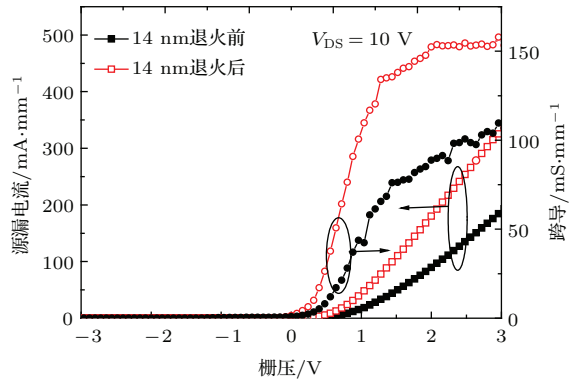


图 9 (网刊彩色) 退火前后转移特性和跨导对比
Fig. 9. (color online) The transfer characteristics and the transconductance before and after annealing.

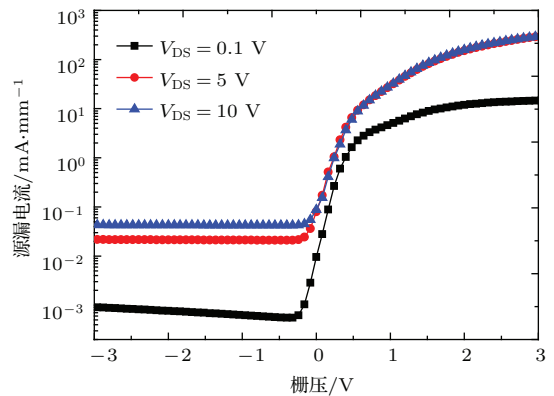


图 10 (网刊彩色) 14 nm GaN 沟道器件不同漏压转移曲线
Fig. 10. (color online) The transfer curves under different bias drain voltage.

当器件偏置在不同的漏压下, 由于存在 DIBL 效应和短沟道效应, 阈值电压会出现漂移. 通常用

阈值电压漂移对漏源电压的变化率来衡量短沟道效应^[7], 即

$$DIBL = \frac{\Delta V_{th}}{\Delta V_{DS}} = \frac{V_{th,sat} - V_{th,linear}}{V_{DS,sat} - V_{DS,linear}}, \quad (1)$$

(1) 式中, $V_{DS,sat}$ 表示器件工作在饱和区的漏源电压, $V_{DS,linear}$ 表示器件工作在线性区的漏源电压, $V_{th,sat}$ 表示漏源电压为 $V_{DS,sat}$ 时器件的阈值电压, $V_{th,linear}$ 表示漏源电压为 $V_{DS,linear}$ 时器件的阈值电压. 图 10 显示了 14 nm GaN 沟道厚度器件的不同漏电压下的转移特性曲线, 经过计算, 得到 GaN 沟道厚度为 14 nm 器件的 DIBL 值为 16 mV/V. 该结果表明该双异质结增强型器件对短沟道效应具有较好的抑制作用, 采用双异质结有效地提高了沟道 2DEG 的限域性.

4 结 论

采用双异质结材料, 结合 F 注入工艺成功地研制出了较高正向阈值电压的增强型 HEMT 器件, 该实验结果较好地验证了理论模拟结果. 实验所采用的 14, 28 和 60 nm 三种 GaN 沟道厚度的双异质结材料, 均实现了增强型器件, 而器件阈值电压随 GaN 沟道厚度增大而负向移动. 器件的栅反向泄漏电流随 GaN 沟道厚度的增大而增大. 对 14 nm GaN 沟道厚度的器件进行 350 °C 的高温退火后, 器件阈值电压仅有较小的负向移动. 实验中采用了降低的 F 等离子体注入功率, 这使得器件在不经高温退火修复沟道迁移率损伤的情况下就有较高的饱和电流和跨导特性. 对 14 nm GaN 沟道厚度的器件在不同漏压下分析了 DIBL 效应, 计算得到

DIBL 值为 16 mV/V.

参考文献

- [1] Zhang Z L, Yu G H, Zhang X D, Tan S X, Wu D D, Fu K, Huang W, Cai Y, Zhang B S 2015 *Electron. Lett.* **51** 1201
- [2] Zhang X Y, Tan R B, Sun J D, Li X X, Zhou Y, Lü L, Qin H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 105201
- [3] Sun W W, Zheng X F, Fan S, Wang C, Du M, Zhang K, Chen W W, Cao Y R, Mao W, Ma X H, Zhang J C, Hao Y 2015 *Chin. Phys. B* **24** 017303
- [4] Wang W K, Li Y J, Lin C K, Chan Y J, Chen G T, Chyi J I 2004 *IEEE Trans. Electron Dev.* **25** 52
- [5] Cai Y, Zhou Y G, Lau K M, Chen K J 2006 *IEEE Trans. Electron Dev.* **53** 2207
- [6] Tohru, Tomohiro N 2008 *IEEE Trans. Electron Dev.* **29** 668
- [7] Zanandrea A, Bahat-Treidel E, Rampazzo F, Stocco A, Meneghini M, Zanoni E, Hilt O, Ivo P, Wuerfl J, Meneghesso G 2012 *Microelectron. Reliab.* **52** 2426
- [8] Park P S, Siddharth R 2011 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **58** 704
- [9] Saito W, Takada Y, Kuraguchi M, Tsuda K, Omura I 2006 *IEEE Trans. Electron Dev.* **53** 356
- [10] Zervos M, Kostopoulos A, Constantinidis G, Kayambaki M, Georgakilas A 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 4387
- [11] Wang X H, Huang S, Zheng Y K, Wei K, Chen X J, Zhang H X, Liu X Y 2014 *IEEE Trans. Electron Dev.* **61** 1341
- [12] Martin-Horcajo S, Tadjer M J, Romero M F, Cuerdo R, Calle F 2011 *Proceedings of the 8th Spanish Conference on Electron Devices* Palma de Mallorca, Illes Balears, Feb. 8–11, 2011
- [13] Ha W J, Chhajed S, Oh S J, Hwang S Y, Kim J K, Lee J H, Kim K S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 132104
- [14] Miller E J, Dang X Z, Yu E T 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5952

Enhancement mode AlGa_N/Ga_N double heterostructure high electron mobility transistor with F plasma treatment*

Wang Chong[†] Zhao Meng-Di Pei Jiu-Qing He Yun-Long Li Xiang-Dong
Zheng Xue-Feng Mao Wei Ma Xiao-Hua Zhang Jin-Cheng Hao Yue

(Key Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices, the Institute of Microelectronics,
Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 10 August 2015; revised manuscript received 20 November 2015)

Abstract

Effects of double heterostructure materials (AlGa_N/Ga_N/AlGa_N/Ga_N) with different Ga_N channel thickness values (14 nm, 28 nm, 60 nm) on the high electron mobility transistor (HEMT) are simulated by using silvaco, and furthermore, the differences in characteristic among the enhancement mode devices made from such double heterostructure materials with different F injection doses (150 W, 135 W) are also simulated. The simulation results show that the threshold voltage shifts towards positive direction and the saturation current decreases as the Ga_N channel thickness decreases. The two-dimensional electron gas (2 DEG) density could be reduced as Ga_N channel thickness decreases due to piezoelectric polarization weakened by backing AlGa_N barrier. Combining F plasma treatment and double heterostructure material, the enhancement mode device with high positive threshold voltage is successfully developed. The DC characteristics of the enhancement mode devices with different Ga_N channel thickness values are analyzed comparatively, and the simulation results are validated by using the experimental results. The threshold voltages of these enhancement mode devices with Ga_N channel thickness values of 14 nm, 28 nm, and 60 nm reach 1.1 V, 0.8 V, and 0.3 V, respectively. The maximum transconductance values of these enhancement mode devices with Ga_N channel thickness values of 14 nm, 28 nm, and 60 nm reach 115 mS/mm, 137 mS/mm, and 198 mS/mm, respectively. The thinner Ga_N channel thickness in the double heterostructure could reduce the depth of quantum well and 2 DEG density, so that the device with a Ga_N channel thickness of 14 nm has a lower saturation current. The breakdown voltages and gate reverse leakage currents of the three kinds of devices are investigated, and the device with a thinner Ga_N channel has a lower leakage current and higher breakdown voltage due to weakened vertical electrical field in thinner channel double heterostructure. The damage of channel mobility in F plasma treatment is weakened by using a lower plasma power (135 W), and the enhancement mode device without annealing process demonstrates a better saturation current and transconductance characteristic. The results of the device with annealing confirm that the plasma damage is depressed at an F injection power of 135 W. The threshold voltage temperature stability of 14 nm Ga_N channel thickness device is studied, and ΔV_{th} is only 0.4 V after 350 °C 2 min annealing process. Drain induced barrier lowering (DIBL) effects of the HEMTs with double heterostructures are investigated, and the DIBL value of the 14 nm Ga_N channel device is 16 mV/V. The DIBL value indicates a good limiting property of the 2 DEG in double heterostructure device.

Keywords: double heterostructure, enhancement mode device, F plasma, drain induced barrier lowering effect

PACS: 85.30.Tv, 73.40.-c, 85.35.Be

DOI: 10.7498/aps.65.038501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61574110, 61574112, 61106106).

† Corresponding author. E-mail: wangchong197810@hotmail.com