

# F 离子注入新型 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT 器件耐压分析\*

段宝兴<sup>1)†</sup> 杨银堂<sup>1)</sup> 陈敬<sup>2)</sup>

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

2) (香港科技大学电子与计算机工程系, 香港)

(2012 年 4 月 23 日收到; 2012 年 6 月 18 日收到修改稿)

为了缓解  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  high electron mobility transistors (HEMT) 器件 n 型 GaN 缓冲层高的泄漏电流, 本文提出了具有氟离子注入新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaIn}$  HEMT 器件新结构. 首先分析得出 n 型 GaN 缓冲层没有受主型陷阱时, 器件输出特性为欧姆特性, 这样就从理论和仿真方面解释了文献生长 GaN 缓冲层掺杂 Fe, Mg 等离子的原因. 利用器件输出特性分别分析了栅边缘有和没有低掺杂漏极时, 氟离子分别注入源区、栅极区域和漏区的情况, 得出当氟离子注入源区时, 形成的受主型陷阱能有效俘获源极发射的电子而减小 GaN 缓冲层的泄漏电流, 击穿电压达到 262 V. 通过减小 GaN 缓冲层体泄漏电流, 提高器件击穿电压, 设计具有一定输出功率新型  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  HEMT 提供了科学依据.

**关键词:**  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ , HEMT, 氟离子, 击穿电压

**PACS:** 73.40.Kp, 73.40.Vz, 73.61.Ey

## 1 引言

氮化镓 (GaN) 是第三代宽禁带半导体材料之一, 是发展大功率、高频高温、抗强辐射、蓝光激光器和紫外探测器等技术的核心材料<sup>[1,2]</sup>. 非常适合于制作抗辐射、高频、大功率和高密度集成的电子器件及光电子器件. GaN 材料具有的极化效应, 高的禁带宽度 ( $\geq 3.4$  eV)、高的电子饱和速度 ( $2.2 \times 10^7$  cm/s) 和大的临界击穿电场 ( $\geq 3$  MV/cm) 等优点, 尤其外延在高热导率 SiC 衬底上的  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  HEMT (high electron mobility transistor) 器件, 是军用微波信号放大系统的核心.  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  HEMT 微波功率器件在军用电子装备和武器系统中具有其他器件无法比拟的优点, 它的研究和应用速度超过所有其他种类的固态微波功率器件.

$\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  HEMT 是以  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  异质结材料为基础制造的 GaN 基微波功率器件. 目前  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  HEMT 器件的研究主要通过电场优化提高击穿电压<sup>[3-7]</sup>、通过结构设计缓解电流崩塌<sup>[8,9]</sup> 以及提高器件可靠性<sup>[10,11]</sup> 等. 由于  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  异质结利用自发极化和压电极化效应形成高密度二维电子气 (two dimensional electron gas, 2DEG), 使这种结构具有很低的导通电阻, 然而, 实现一定功率密度和满足特定电压转换的功率器件, 击穿电压是一个非常重要的参数, 研究者针对硅功率器件已经设计了多种优化功率器件击穿电压和比导通电阻的方法和技术<sup>[12-17]</sup>. 然而,  $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$  HEMT 器件特殊的耐压机理使得设计优化高击穿电压的硅技术不能直接移植于 HEMT 器件<sup>[16-18]</sup>. 为了降低 GaN 缓冲层体漏电流, 要求 GaN 层的电阻率越高越好, 目前质量最好的 GaN 外延层电子浓度 (由氮空位或氧掺杂引起) 可以低

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61106076) 和国家自然科学基金重点项目 (批准号: 61234006) 资助的课题.

† E-mail: bxduan@163.com

于  $10^{15}/\text{cm}^3$ . 然而即使这种低浓度的 GaN 层, 在器件源漏欧姆接触条件下, 器件输出特性表现为电阻, 而实际制作的 AlGaIn/GaN HEMT 器件却能承担数百伏甚至千伏以上的电压, 我们分析认为, GaN 层中的受主型陷阱能有效俘获 GaN 层引起漏电流的电子, 在泄漏电流达到一定值前, 器件承受高电压.

本文首次提出了一种具有氟 (fluoride) 离子注入新型 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构, 注入的 F 离子在 GaN 缓冲层中形成的陷阱有效俘获了引起体漏电流的电子, 使得器件击穿电压提高. 利用电场调制原理 [19–22] 在靠近漏极的栅极区域形成 LDD (low density drain) 调制高密度 2DEG 分布 [23], 实现了硅基功率器件设计中降低表面电场的 RESURF (REduced SURface Field) 技术, 使 Al-GaN/GaN HEMT 器件的表面电场达到优化, 本文通过同时降低体泄漏电流和优化器件表面电场, 提高了器件的击穿电压. 借助器件仿真软件 ISE 分析表明, F 离子注入新型 AlGaIn/GaN HEMT 器件的体泄漏电流减小, 击穿电压提高.

## 2 器件结构

AlGaIn/GaN 异质结的极化效应形成了高密度 2DEG, 异质结的极化包括压电极化和材料自发极化, 总的极化感应电荷  $\sigma(x)$  为

$$\sigma(x) = P_{\text{自发}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) - P_{\text{压电}}(\text{GaN}) + P_{\text{压电}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}) - P_{\text{压电}}(\text{GaN}), \quad (1)$$

其中,  $P_{\text{自发}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})$  和  $P_{\text{自发}}(\text{GaN})$  分别为 AlGaIn 和 GaN 材料的自发极化,  $P_{\text{压电}}(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N})$  和  $P_{\text{压电}}(\text{GaN})$  为两种材料由于压电效应形成的压电极化.

AlGaIn/GaN HEMT 中为了屏蔽 AlGaIn/GaN 异质结的极化感应电荷, 在 GaN 表面的低势垒沟道区形成了用于导电的高密度 2DEG. AlGaIn/GaN HEMT 器件的耐压机理与传统 Si 基 pn 结或 MOS 结构 (包括 SiC 基材料) 不同, 认识这种特殊的器件耐压机理是设计优化 AlGaIn/GaN HEMT 击穿电压的关键 [16–18].

如图 1 所示为本文提出的 F 离子注入新型 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构示意图, 其中外延在半绝缘衬底上的 GaN 缓冲层为 n 型, 通过异质外延 AlGaIn 层形成 AlGaIn/GaN 异质结, 由于 AlGaIn 的极化效应, 在异质结低势垒的沟道区形成高浓

度 2DEG. 源极和漏极为具有低导通电阻的欧姆接触, 栅极为肖特基接触. 器件开启, 即栅极肖特基结正偏或栅极电压为零, 漏极相对源极为高电压时, 由于源漏电极的欧姆接触而形成从漏极到源极 (电子从源极到漏极) 的正向电流; 器件关断, 即栅极肖特基结反偏, 漏极相对源极为高电压时, 形成从漏极到源极的泄漏电流, 器件类似于具有一定电阻率的 GaN 缓冲层导通特性. 由于外延工艺生长的 GaN 缓冲层为 n 型, 且具有不小于  $10^{15}/\text{cm}^3$  的电子浓度, 因此 AlGaIn/GaN HEMT 器件的关断特性为源漏欧姆特性, 器件具有宏观的泄漏电流, 关断时无法承担一定的反向电压. 为了解决这个矛盾, 国际上通过生长 GaN 缓冲层时掺杂一定的受主型陷阱减小形成泄漏电流的电子数量 [24–28], 但是受主型陷阱也会俘获沟道区的 2DEG 引起器件电流崩塌, 频率下降.

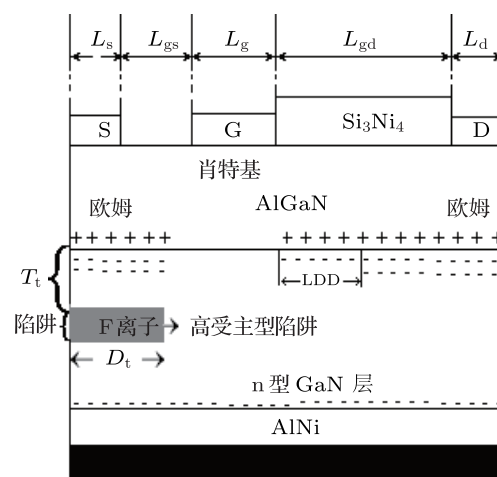


图 1 F 离子注入新型 AlGaIn/GaN HEMTs 结构示意图

本文为了缓解这种矛盾, 首次提出了具有 F 离子注入新型 AlGaIn/GaN HEMT 结构, 如图 1 所示, 注入的 F 离子形成了高密度受主型陷阱, 能有效俘获从源极发射出来的电子数量, 从而减小 GaN 缓冲层的泄漏电流, 提高器件的击穿电压. F 离子注入在 GaN 缓冲层一定区域, 即距离 AlGaIn/GaN 异质结为  $T_t$ , 注入的范围为  $D_t$ , 这样就减小了受主型陷阱对器件沟道区 2DEG 的影响. 本文分别分析了 F 离子注入在源区、栅极区域和漏区的击穿电压和电场分布, 得出 F 离子注入 AlGaIn/GaN HEMT 器件源区对减小 GaN 缓冲层泄漏电流最有效. 图 1 中的器件结构参数分别为:  $L_s$  为源极长度;  $L_{gs}$  为栅源距离;  $L_g$  为栅极长度;  $L_{gd}$  为栅漏距离;

$L_d$  为漏极长度. 本文讨论中非掺杂 AlGaIn 外延层厚度为 20 nm, Al 掺杂浓度为 25%; GaN 缓冲层厚度为 3  $\mu\text{m}$ , n 型浓度为  $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ; 器件结构参数为:  $L_s = L_g = L_d = L_{gs} = 1 \mu\text{m}$ ,  $L_{gd} = 5 \mu\text{m}$ .

### 3 结果及分析

由于 GaN 材料特殊的生长工艺, 对于未掺杂的 GaN 缓冲层, 导电性显示 n 型, 并且浓度不小于  $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ . 非故意掺杂 GaN 缓冲层通过 MOCVD 或 MBE 生长时, 由于氧的掺杂或氮的空位, 导致 GaN 材料表现出低阻 n 型导电特性, 形成的电子器件表现为欧姆特性 [24–28]. 当  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件的漏极为正偏压时, 输出的  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  由于源极和漏极欧姆接触而表现出欧姆特性, 从图 2 可以看出, 即使 2DEG 耗尽, 曲线的斜率随 GaN 缓冲层浓度增加而增加. 图 2 显示了不同浓度 n 型掺杂 GaN 缓冲层的  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ . 可以看出,  $I_{\text{DS}}$  随  $V_{\text{DS}}$  线性增加, 这是典型的欧姆特性.

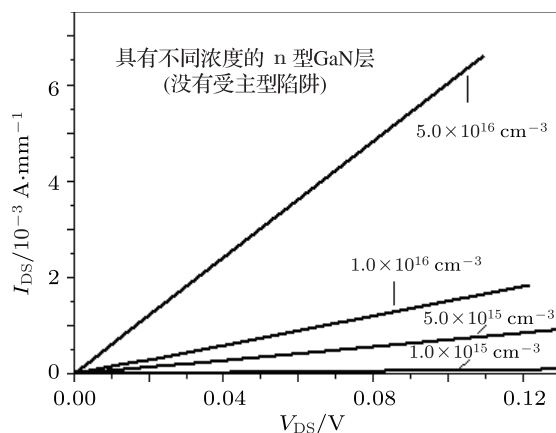


图 2  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (GaN 缓冲层没有受主型缺陷)

为了减小 GaN 缓冲区的泄漏电流以提高击穿电压, 已经在 GaN 分子束外延工艺中引入了深能级缺陷. 这些深能级缺陷起陷阱作用, 可以俘获从源电极发射的电子 [24–28], 这些电子是引起 GaN 缓冲层泄漏电流的主要原因. 为了减小泄漏电流, 获得与击穿特性相同的曲线, 本文利用仿真软件, 在 GaN 缓冲层中引入受主型缺陷, GaN 层 n 型浓度一定时, 获得一定的击穿电压. 当漏极为正电压, 栅极形成的肖特基结反偏时, 从源电极释放的电子经过 GaN 缓冲层被受主型陷阱俘获, 大大减小了 GaN 层泄漏电流.  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  曲线与测试结果符

合 (如图 3 所示). 所以, 为了获得一定的击穿电压,  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件的受主型陷阱是一个重要参数, 本文通过模拟仿真解释了这个原因.

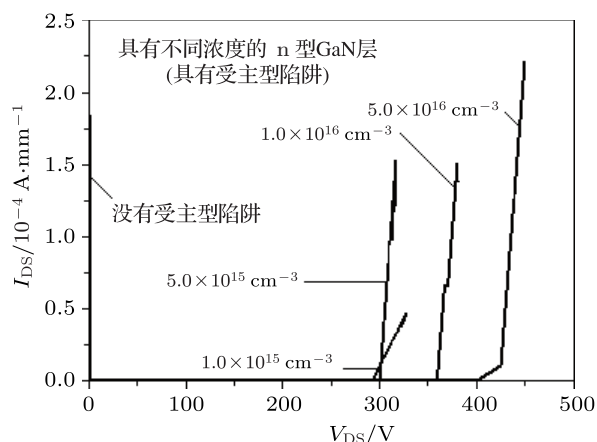


图 3  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 击穿曲线 (GaN 缓冲层中具有一定浓度的受主型缺陷)

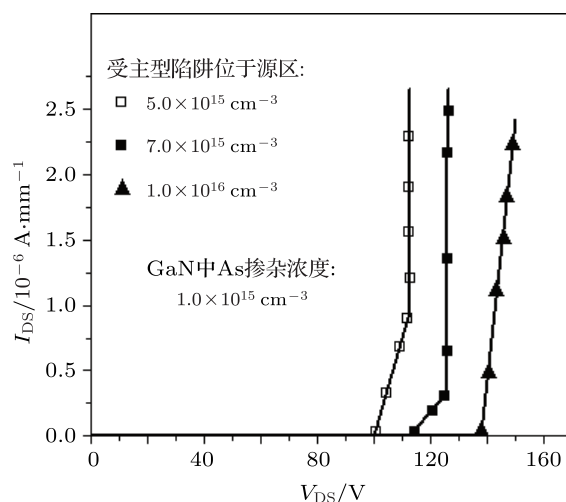


图 4 F 离子注入源区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (没有 LDD 的情况)

图 4 和图 5 所示为针对提出的 F 离子注入新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件结构, 当 F 离子注入源区, 即  $D_t = L_s + L_{gs}$  时, 器件关断状态下漏极电压与漏极电流的关系曲线. F 离子注入 GaN 缓冲层后分布在一定的范围, 且对 GaN 缓冲层材料造成一定损伤, 经过 400  $^{\circ}\text{C}$  退火可以修复部分损伤的材料. 图 4 为没有 LDD, 注入源区的 F 离子形成的受主型陷阱浓度分别为  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ,  $7 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ,  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  时的情况, 可以看出, 随着受主型陷阱浓度的增加, 器件达到设定的漏极泄漏电流  $1 \times 10^{-4} \text{ A/mm}$  时的漏极电压增大 ( $1 \times 10^{-4} \text{ A/mm}$  漏极泄漏电流是国际上普遍采用的 AlGaIn/GaN HEMT 器件达到击穿条件时的判

据). 这是因为, 随着 F 离子注入形成受主型陷阱浓度的增加, 从源极发射进入 GaN 缓冲层形成体泄漏电流的电子被俘获的概率和数量增大, 能达到漏极区域的电子数量减小, 所以击穿电压增大. 当受主型陷阱浓度为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  时, 击穿电压为 140 V. 如图 5 所示, 当栅极边缘形成 LDD 结构时<sup>[3,17]</sup>, 击穿电压增加, 这是因为 LDD 结构有效地减小了栅边缘的高峰电场, 峰值电场的降低, 减小了漏极电流中从栅极发射形成泄漏电流的部分. F 离子注入受主型陷阱浓度为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  时, 器件的击穿电压提高为 220 V 左右.

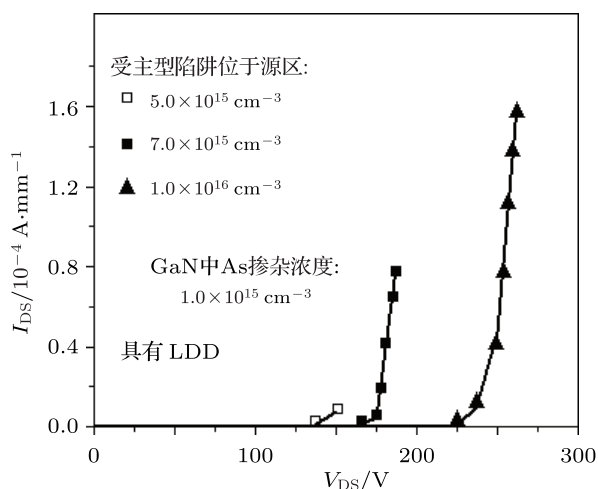


图 5 F 离子注入源区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (具有 LDD 的情况)

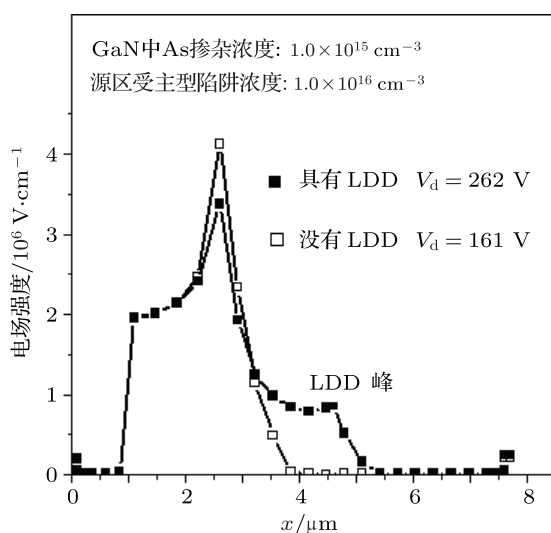


图 6 F 离子注入源区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 表面电场分布

图 6 为本文提出的 F 离子注入源区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件表面电场分布, F 离子注入的主要目的是通过减小 GaN 缓冲层的体

泄漏电流, 提高器件的击穿电压. 在设定 n 型 GaN 缓冲层浓度为  $1.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$  时, 注入的 F 离子形成的有效受主型陷阱浓度为  $1.0 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ . F 离子注入的区域为  $D_t = L_s + L_{\text{gs}}$ . 由图 6 可以看出, 具有 LDD 结构的器件栅极边缘高电场峰显著降低, 这是由于位于 AlGaN 层中的负电荷, 通过电场调制辅助耗尽了 2DEG, 在栅极高电场达到临界击穿电场时, 击穿电压从没有 LDD 结构的 161 V 增加到 LDD 结构的 262 V. LDD 通过产生新的电场峰 (LDD peak) 而使决定器件击穿的栅漏边缘高电场峰有效降低.

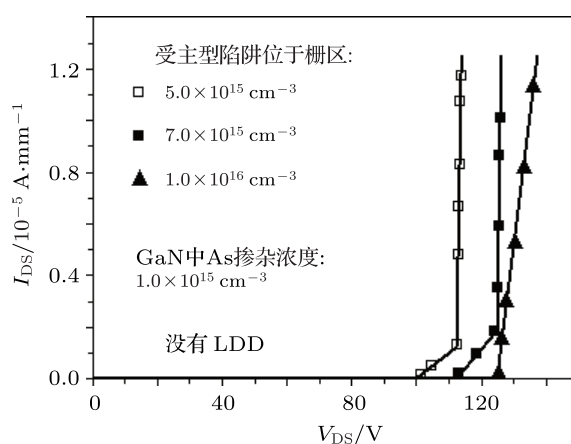


图 7 F 离子注入栅极区域  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (没有 LDD 的情况)

图 7 和图 8 所示针对 F 离子注入新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件结构, 当 F 离子注入栅极区域, 即  $D_t = L_g$  时, 器件关断状态下漏极电压与漏极电流的关系曲线. 当没有 LDD 时, 随着受主型陷阱浓度的增加, 器件达到设定的漏极泄漏电流  $1 \times 10^{-4} \text{ A/mm}$  时的漏极电压增大 (如图 7 所示). 注入栅极区域的 F 离子形成的受主型陷阱浓度分别为  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ,  $7 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ,  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ , 可以看出, 当 F 离子注入栅极区域形成的受主型陷阱浓度为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  时, 击穿电压为 128 V. 随着 F 离子注入形成受主型陷阱浓度的增加, 击穿电压增大的原因与注入源区的相同. 如图 8 所示, 当栅极边缘形成 LDD 结构时击穿电压进一步增加, 这是因为 LDD 结构有效地减小了栅边缘的高峰电场. 当 F 离子注入受主型陷阱浓度为  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$  时, 器件的击穿电压提高为 165 V 左右. 与图 4 和图 5 的结果进行比较可以看出, F 离子注入源区时的击穿电压较高, 这是因为形成 GaN 缓冲层体泄漏电流的电子从源电极发射, 注入源区的 F 离子形成的

受主型陷阱可以有效地将电子俘获而减小漏电流, 当达到设定的漏极泄漏电流  $1 \times 10^{-4}$  A/mm 时击穿电压提高.

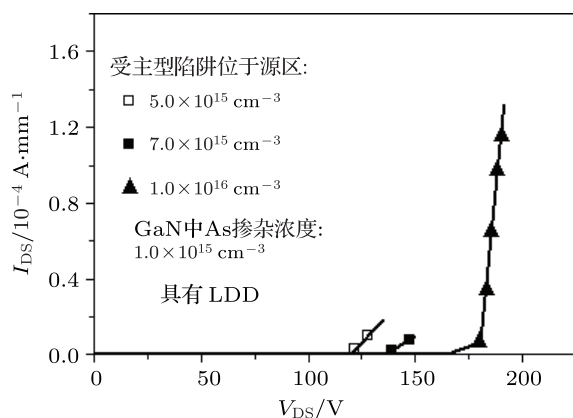


图 8 F 离子注入栅极区域  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (具有 LDD 的情况)

图 9 为 F 离子注入栅极区域, 即  $D_t = L_g$  时  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件表面电场分布. 由图 9 可以看出, 具有 LDD 结构的器件由于产生了新的电场峰而使栅极边缘高电场峰显著降低, 击穿电压从没有 LDD 结构的 146 V 增加到 LDD 结构的 192 V. 与图 6 的结果比较可以看出, F 离子注入源区时的击穿电压最高为 262 V, 这就为设计 F 离子注入有效区域提供了科学依据.

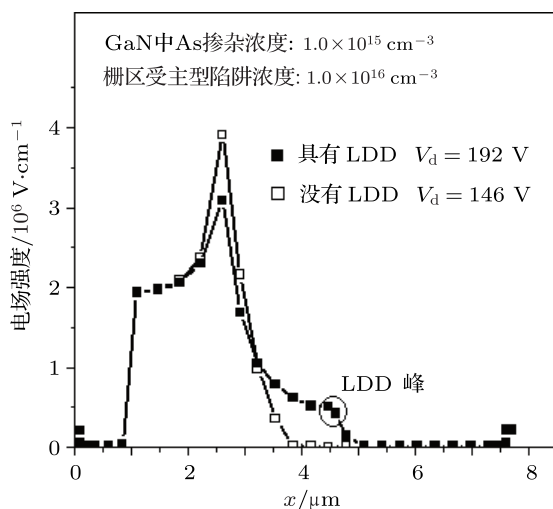


图 9 F 离子注入栅区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 表面电场分布

图 10 和图 11 所示为 F 离子注入漏极区域, 即  $D_t = L_{\text{gd}} + L_d$  时, 器件关断状态下漏极电压与漏极电流的关系曲线. 注入漏区的 F 离子形成的

受主型陷阱浓度分别为  $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ,  $7 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ ,  $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ . 可以看出, 随着 F 离子注入形成受主型陷阱浓度的增加, 击穿电压基本不变. 对于没有 LDD 的情况, 击穿电压最高为 112 V 左右 (如图 10 所示). 当栅极边缘形成 LDD 结构时击穿电压进一步增加到 140 V, 但与受主型陷阱的浓度关系不大 (如图 11 所示). 这是因为从源电极发射的电子没有被有效俘获, GaN 缓冲层的体泄漏电流与注入的受主型陷阱浓度基本无关. 图 12 为 F 离子注入漏极区域时的表面电场分布. 可以看出, 具有 LDD 结构的器件由于产生了新的电场峰而使栅极边缘高电场峰显著降低, 击穿电压从没有 LDD 结构的 125 V 增加到 LDD 结构的 162 V. 但与 F 离子注入到源区和栅电极区域的结果比较最低.

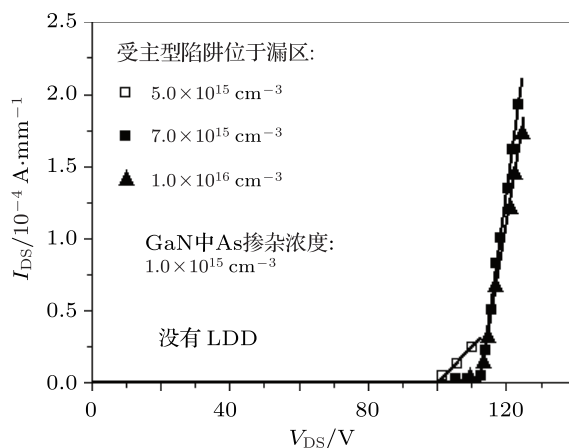


图 10 F 离子注入漏区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (没有 LDD 的情况)

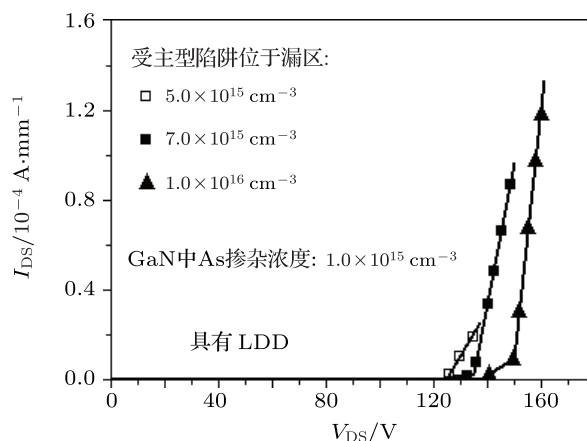


图 11 F 离子注入漏区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT  $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$  特性 (具有 LDD 的情况)



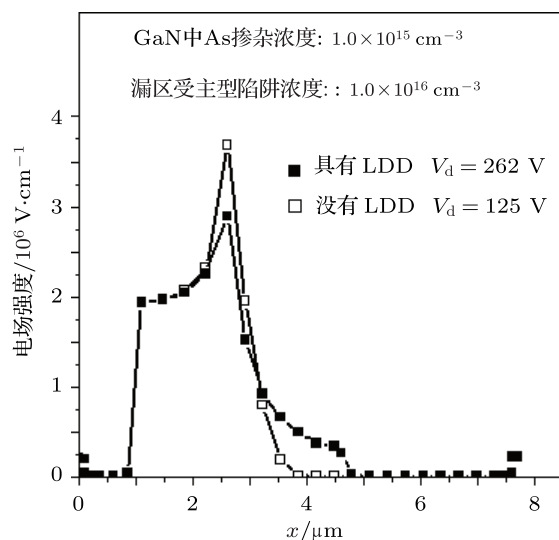


图 12 F 离子注入漏区新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 表面电场分布

## 4 结论

本文为了解决  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  HEMT 器件 GaN

缓冲层高的泄漏电流, 首次提出了 F 离子注入新型  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT 器件结构. 首先分析了 n 型 GaN 缓冲层没有受主型陷阱时, 器件输出特性为欧姆特性, 不可能承担一定的击穿电压, 为提出 F 离子注入高受主型陷阱结构提供了设计依据, 也从理论和仿真方面解释了文献生长 GaN 缓冲层掺杂 Fe, Mg 等离子体的原因. 本文利用电流 - 电压输出特性分别分析了栅边缘有和没有 LDD 时, F 离子注入源区、栅极区域和漏区的情况, 得出当 F 离子注入源区时, 能有效减小 GaN 缓冲层的泄漏电流, 击穿电压最大. 为通过减小 GaN 缓冲层体泄漏电流, 提高器件击穿电压, 设计具有 F 离子注入新型  $\text{AlGaIn}/\text{GaN}$  HEMT 提供了科学依据.

本文的工作得到了香港科技大学陈敬教授和西安电子科技大学朱樟明教授的指导和帮助, 陈教授是国际 GaN HEMTs 增强型器件研究领域的权威, 在他的指导下促使作者将研究内容整理成文发表以供同行参考.

- [1] Malinowski P E, Joachim John, Jean Yves Duboz 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **23** 1308
- [2] Chumbes E M, Schremer A T, Smart J A 2001 *IEEE Transactions on Electron Devices* **48** 420
- [3] Song D, Liu J, Cheng Z Q, Wilson C W, Tang K M L, Chen K J 2007 *IEEE Electron Device Lett.* **28** 189
- [4] Ando Y, Okamoto Y, Miyamoto H, Nakayama T, Inoue T, Kuzuhara M 2003 *IEEE Electron Device Lett.* **24** 289
- [5] Saxler Y F W A, Moore M, Smith R P, Sheppard S, Chavarkar P M, Wisleder U K M, Parikh D P 2004 *IEEE Electron Device Lett.* **25** 117
- [6] Hsien C C, Chia S C, Yuan J S 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** 1183
- [7] Tipirneni N, Koudymov A, Adivarahan V, Yang J G S, Asif Khan M 2006 *IEEE Electron Device Lett.* **27** 716
- [8] Subramaniam A, Takashi E, Lawrence S and Hiroyasu I 2006 *Japanese Journal of Applied Physics* **45** L220
- [9] Bardwell J A, Haffouz S, McKinnon W R, Storey C, Tang H, Sproule G I, Roth D, Wang R 2007 *Electrochemical and Solid-State Letters* **10** H46
- [10] Arulkumaran S, Liu Z H, Ng G I, Cheong W C, Zeng R, Bu J, Wang H, Radhakrishnan K, Tan C L 2007 *Thin Solid Films* **515** 4517
- [11] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H, Jimbo T 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3110
- [12] Chen X B, Johnny K O S 2001 *IEEE Trans Electron Devices.* **48** 344
- [13] Sameh G, Nassif K, Salama C A T 2003 *IEEE Trans. Electron Devices.* **50** 1385
- [14] Shreepad K, Michael S S, Grigory S 2005 *Trans. Electron Devices.* **52** 2534
- [15] Wataru S, Masahiko K, Yoshiharu T 2005 *IEEE Trans. Electron Devices* **52** 106
- [16] Duan B X, Yang Y T 2012 *Micro & Nano Letter.* **7** 9
- [17] Duan B X, Yang Y T 2012 *Sci China Inf Sci.* **55** 473
- [18] Hidetoshi I, Daisuke S, Manabu Y, Yasuhiro U, Hisayoshi M, Tetsuzo U, Tsuyoshi T, Daisuke U 2008 *IEEE Electron Device Lett.* **29** 1087
- [19] Duan B X, Yang Y T, Zhang B, Hong X F 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 1329
- [20] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2009 *IEEE Electron Device Lett.* **30** 305
- [21] Duan B X, Yang Y T 2011 *IEEE Trans. Electron Devices* **58** 2057
- [22] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2010 *Solid-State Electronics* **54** 685
- [23] Shreepad K, Deng J Y, Michael S S, Remis G 2001 *IEEE Electron Device Lett.* **22** 373
- [24] Heikman S, Keller S, DenBaars S P, Mishra U K 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 439
- [25] Tang H, Webb J B, Bardwell J A, Raymond S, Salzman J, Uzan-Saguy C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 757
- [26] Webb J B, Tang H, Rolfe S, Bardwell J A 1999 *Appl. Phys. Lett.* **75** 953
- [27] Katzer D S, Storm D F, Binari S C, Roussos J A, Shanabrook B V, Glaser E R 2003 *J. Cryst. Growth.* **251** 481
- [28] Poblentz C, Waltereit P, Rajan S, Heikman S, Mishra U K, Speck J S 2004 *J. Vac. Sci. Technol. B* **22** 114

# Breakdown voltage analysis for new $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ HEMT with F ion implantation\*

Duan Bao-Xing<sup>1)†</sup> Yang Yin-Tang<sup>1)</sup> Kevin J. Chen<sup>2)</sup>

1) ( Key Laboratory of the Ministry of Education for Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China )

2) ( Department of Electronic and Computer Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Clear Water Bay, Hong Kong, China )

( Received 23 April 2012; revised manuscript received 18 June 2012 )

## Abstract

In order to alleviate the leakage current of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMT) device with the N-type GaN buffer, the new  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$  HEMT with the Fluoride ion implantation is proposed for the first time in this paper. Firstly, the output characteristic has the ohmic characteristic for the AlGaIn/GaN HEMT without acceptor-type trap, which explains why Fe and Mg are doped into the GaN buffer layer as reported in the literature in theory and simulation. By using the output characteristics of the  $I_{\text{ds}}-V_{\text{ds}}$  for the AlGaIn/GaN HEMTs with and without low density drain, the results are obtained that fluoride ion implantation can capture effectively the electrons emitted from the source to reduce the leakage current of the GaN buffer compared with fluoride ions in the gate and the drain regions. The breakdown voltage goes up to 262 V. The scientific basis is set up for designing the new AlGaIn/GaN HEMT with both the low leakage current and the high breakdown voltage.

**Keywords:** AlGaIn/GaN, HEMT, fluoride ion, breakdown voltage

**PACS:** 73.40.Kp, 73.40.Vz, 73.61.Ey

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61106076), and the State Key Program of National Natural Science of China (Grant No.61234006).

† E-mail: bxduan@163.com