

具有部分本征 GaN 帽层新型 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管特性分析

郭海君 段宝兴 袁嵩 谢慎隆 杨银堂

Characteristic analysis of new AlGaN/GaN high electron mobility transistor with a partial GaN cap layer

Guo Hai-Jun Duan Bao-Xing Yuan Song Xie Shen-Long Yang Yin-Tang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 167301 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.167301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.167301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有纵向辅助耗尽衬底层的新颖横向双扩散金属氧化物半导体场效应晶体管

Novel lateral double-diffused MOSFET with vertical assisted deplete-substrate layer

物理学报.2017, 66(7): 077302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.077302>

1 k Ω 量子霍尔阵列电阻标准器件研制

A 1 k Ω standard resistor device based on quantum Hall array

物理学报.2016, 65(22): 227301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.227301>

利用 p-n⁺ 结反向 I-V 特性计算 p-GaN 载流子浓度的方法

A new method to estimate the p-GaN carrier concentration by analyzing the reversed current-voltage characteristic curve of p-n⁺ junction diode

物理学报.2016, 65(19): 197302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.197302>

阶梯 AlGa_{0.25}N 外延新型 Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN HEMTs 器件实验研究

Experimental research on the new Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN HEMTs with a step AlGa_{0.25}N layer

物理学报.2015, 64(23): 237302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237302>

具有半绝缘多晶硅完全三维超结横向功率器件

Complete three-dimensional reduced surface field super junction lateral double-diffused metal-oxide-semiconductor field-effect transistor with semi-insulating poly silicon

物理学报.2015, 64(18): 187303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.187303>

具有部分本征GaN帽层新型AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管特性分析*

郭海君 段宝兴[†] 袁嵩 谢慎隆 杨银堂

(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)

(2017年4月11日收到; 2017年6月5日收到修改稿)

为了优化传统AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistors, HEMTs)器件的表面电场, 提高击穿电压, 本文提出了一种具有部分本征GaN帽层的新型AlGaN/GaN HEMTs器件结构. 新型结构通过在AlGaN势垒层顶部、栅电极到漏电极的漂移区之间引入部分本征GaN帽层, 由于本征GaN帽层和AlGaN势垒层界面处的极化效应, 降低了沟道二维电子气(two dimensional electron gas, 2DEG)的浓度, 形成了栅边缘低浓度2DEG区域, 使得沟道2DEG浓度分区, 由均匀分布变为阶梯分布. 通过调制沟道2DEG的浓度分布, 从而调制了AlGaN/GaN HEMTs器件的表面电场. 利用电场调制效应, 产生了新的电场峰, 且有效降低了栅边缘的高峰电场, AlGaN/GaN HEMTs器件的表面电场分布更加均匀. 利用ISE-TCAD软件仿真分析得出: 通过设计一定厚度和长度的本征GaN帽层, AlGaN/GaN HEMTs器件的击穿电压从传统结构的427 V提高到新型结构的960 V. 由于沟道2DEG浓度减小, 沟道电阻增加, 使得新型AlGaN/GaN HEMTs器件的最大输出电流减小了9.2%, 截止频率几乎保持不变, 而最大振荡频率提高了12%.

关键词: 高电子迁移率晶体管, 电场调制, 二维电子气, 击穿电压

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

DOI: 10.7498/aps.66.167301

1 引言

以氮化镓(GaN)为代表的宽禁带半导体材料是继以硅(Si)为代表的第一代元素半导体材料和以砷化镓(GaAs)为代表的第二代化合物半导体材料之后, 在近年来迅速发展起来的第三代半导体材料, 具有宽禁带、高击穿场强、高饱和电子速度、高热导率、良好的化学稳定性、强抗辐照能力等优越的特性, 在高功率、高频、高温、抗辐照的电子器件中有着广泛的应用^[1]. 由于强烈的自发极化和压电极化效应^[2,3], 在AlGaN/GaN异质结的界面处产生高浓度($>1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)和高迁移率(1000—2000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)的二维电子气(two dimensional electron gas, 2DEG), 非常适用于微波高功

率应用. 目前, 随着材料质量、外延层设计和制造工艺技术的提高, AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管的功率性能在不断改善^[4]. 为了实现高功率应用, 击穿电压的提高是一种直接的手段. 研究者提出了许多措施来增加击穿电压, 如场板技术^[5-8]、降低表面电场(RESURF)技术^[9]、具有AlGaN沟道的HEMTs新结构^[10]、轻掺杂漏HEMTs新结构^[11]、GaN缓冲层掺杂^[12-14]、AlGaN/GaN/AlGaN双异质结HEMTs等^[15].

通常而言, AlGaN/GaN HEMTs器件在反向工作时, 在栅电极靠近漏电极边缘处存在高峰电场. 降低栅边缘的高峰电场, 从而优化表面电场是提高AlGaN/GaN HEMTs器件击穿电压的一种重

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339900, 2015CB351900)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 61234006, 61334002)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: bxduan@163.com

要技术. 为了降低栅边缘的高峰电场, Si 基功率器件利用了 RESURF 技术^[16], 为了进一步降低体内的高电场, 研究者提出了体电场降低技术^[17]. 但是, AlGaIn/GaN HEMTs 器件不同于传统 Si 基功率器件的特殊耐压机理, 使得设计优化高击穿电压的 Si 技术不能直接移植^[18-21].

文献^[22]报道了在 AlGaIn 势垒层顶部生长一层本征 GaN 帽层时, 由于 GaN 帽层和 AlGaIn 势垒层界面处的极化效应, 感应出负极化电荷, 使得沟道 2DEG 的浓度降低. 并且随着本征 GaN 帽层厚度的增加, 沟道 2DEG 的浓度减小并趋于饱和. 基于此, 本文提出了一种具有部分本征 GaN 帽层新型 AlGaIn/GaN HEMTs 器件结构. 沟道 2DEG 的浓度分布出现分区, 利用电场调制效应, 通过调制沟道 2DEG 的浓度分布, 从而调制了 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的表面电场分布. 这种效应与 CMOS 技术中通过低掺杂漏极形成耗尽区扩展降低高电场的作用相当. 利用 ISE-TCAD 软件仿真分析表明, 通过设计一定厚度和长度的本征 GaN 帽层, 可以使 AlGaIn/GaN HEMTs 器件沟道 2DEG 耗尽区扩展直至完全耗尽, 并且产生了新的电场峰, 有效降低了栅边缘的高峰电场, 将 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的击穿电压从传统结构的 427 V 提高到新型结构的 960 V.

2 器件结构

AlGaIn/GaN HEMTs 器件的耐压机理与传统 Si 基 PN 结或金属氧化物半导体 (MOS) 结构不同. 传统 Si 基功率器件通过 PN 结反向耗尽区扩展承担外加电压, 扩展的耗尽区由起始的中性 P 区与 N 区形成负电荷区 (P 区) 和正电荷区 (N 区). 而 AlGaIn/GaN HEMTs 器件由于强烈的极化效应, 已经形成了高极化电场和高密度电荷 (AlGaIn 表面正电荷和 AlGaIn/GaN 界面的 2DEG 负电荷). 器件的耗尽过程首先是从 GaN 材料的带电状态调整为中性态 (2DEG 被耗尽后), 这与传统 Si 基 PN 结或 MOS 结构不同, 它们开始本身就为中性态; 同时 N 型 GaN 缓冲层也被耗尽^[18-21].

图 1 所示为本文提出的具有部分本征 GaN 帽层新型 AlGaIn/GaN HEMTs 器件结构示意图. 与传统器件结构不同的是, 在 AlGaIn 势垒层顶部, 栅电极到漏电极的漂移区之间引入了部分本征 GaN

帽层. 部分本征 GaN 帽层的存在, 在本征 GaN 帽层和 AlGaIn 势垒层界面处感应出了负极化电荷, 降低了沟道 2DEG 的浓度, 形成了栅边缘低浓度 2DEG 区域, 低浓度的 2DEG 有利于耗尽区扩展直至完全耗尽. 由于沟道 2DEG 的浓度分布由均匀分布变为从栅电极边缘到漏电极漂移区的阶梯分布, 利用电场调制效应, 产生了新的电场峰, 降低了栅边缘的高电场峰, AlGaIn/GaN HEMTs 器件的表面电场分布更加均匀, 击穿电压大大提高. 新型 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的制备过程与传统器件类似, 只是需要在台面隔离之后, 增加一步利用感应耦合等离子体刻蚀技术选择性刻蚀顶部本征 GaN 帽层, 之后热退火修复刻蚀损伤的工艺步骤, 再进行后续的源漏欧姆接触和栅肖特基接触的工艺步骤.

本文分析的 AlGaIn/GaN 异质结结构为衬底, 40 nm 厚的 AlN 成核层, 3 μm 厚非故意掺杂的 GaN 缓冲层, 厚度为 20 nm, Al 组分为 32% 的 AlGaIn 势垒层. 引入部分本征 GaN 帽层的厚度为 T , 长度为 L . 栅源间距、栅长和栅漏距离分别为 1, 1, 和 6 μm.

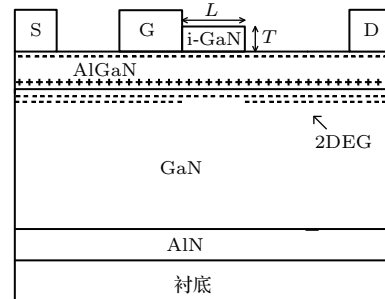


图 1 具有部分本征 GaN 帽层新型 AlGaIn/GaN HEMTs 器件结构示意图

Fig. 1. Cross-sectional diagram of the novel AlGaIn/GaN HEMTs with a partial GaN cap layer.

3 仿真结果与分析

本文的仿真结果是利用 ISE-TCAD 软件获得的. 外延在蓝宝石或碳化硅衬底上的 GaN 缓冲层, 在金属有机物化学气相淀积生长过程中, 即使未人为掺杂, 由于不可避免地引入 Si, O 杂质或 N 空位, 起浅施主的作用, GaN 缓冲层中背景载流子浓度比较高, 表现为 N 型掺杂. 因此在仿真中设置了 N 型掺杂浓度为 $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 为了减小 GaN 缓冲层的泄漏电流, 获得与实际测试结果相一致的击穿曲线, 利用 ISE 仿真软件, 在 GaN 缓冲层中

引入了受主型陷阱^[18-21]. 受主型陷阱的浓度为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 位于导带下方 0.6 eV 处^[13,14], 载流子俘获截面积为 $1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$.

图 2 为击穿条件下 AlGaIn/GaN HEMTs 器件传统结构与具有部分本征 GaN 帽层新型结构等势线分布, 从左至右依次为源电极、栅电极和漏电极. 由于 AlGaIn 势垒层的厚度只有 20 nm, 图 2 中没有明显表示出 AlGaIn 势垒层. 对于传统结构, 高浓度的沟道 2DEG 均匀分布. 当器件反向工作时, 沟道 2DEG 从栅边缘到漏电极的漂移区没有完全耗尽, 为部分耗尽, 如图 2(a) 所示. 对于新型结构, 部分本征 GaN 帽层降低了靠近栅边缘的沟道 2DEG 浓度, 形成了低浓度 2DEG 区域, 沟道 2DEG 耗尽区扩展比传统结构容易, 从栅边缘到漏电极的漂移区已经完全耗尽, 如图 2(b) 所示.

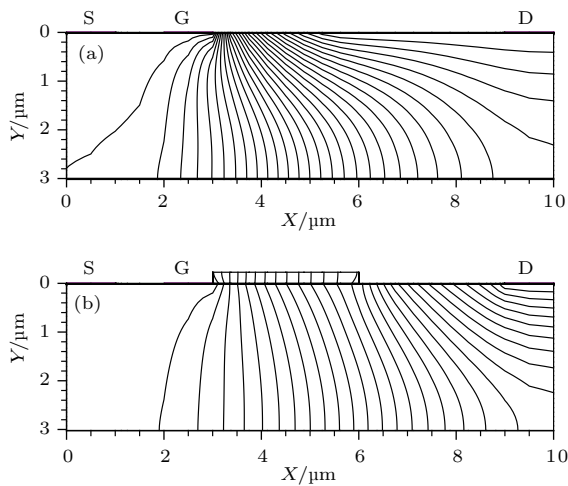


图 2 击穿条件下的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件等势线分布 (a) 传统结构; (b) 新型结构: $T = 228 \text{ nm}$, $L = 3 \mu\text{m}$
Fig. 2. Equipotential distribution of AlGaIn/GaN HEMTs under breakdown conditions: (a) Conventional structure; (b) novel structure: $T = 228 \text{ nm}$, $L = 3 \mu\text{m}$.

图 3 为击穿条件下 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的表面电场分布, 此处的表面电场位于 AlGaIn 势垒层与 GaN 缓冲层的界面. 从图 3(a) 可以看出, 传统结构的电场分布为典型的三角形形状, 在栅电极靠近漏电极边缘处存在一个高峰电场, 沿着漂移区的方向电场逐渐降低. 由于沟道高浓度 2DEG 均匀分布, 从栅电极边缘到漏电极的漂移区没有完全耗尽. 在截止态时, 栅肖特基结反偏, 随着漏端正偏压的增大, 耗尽区的电场强度随之增大, 高电场峰的存在产生了大量的电子空穴对, 称为碰撞电离. 碰撞电离是一个倍增现象, 当碰撞电离率达到无穷

大时, 发生雪崩击穿^[23]. AlGaIn/GaN HEMTs 器件发生击穿的位置一般位于栅边缘. 降低栅边缘处的高峰电场成为提高击穿电压的一种重要技术. 而对于本文提出的新型结构, 其电场分布与传统结构的明显不同之处在于新的电场峰的产生. 这是由于部分本征 GaN 帽层降低了沟道 2DEG 浓度, 形成了栅边缘低浓度 2DEG 区域, 使沟道 2DEG 浓度由均匀分布变为栅电极边缘到漏电极漂移区的阶梯分布, 低浓度的 2DEG 使沟道耗尽区扩展并完全耗尽. 新电场峰的出现, 有效降低了栅边缘的高峰电场, AlGaIn/GaN HEMTs 器件的表面电场分布更加均匀, 击穿电压从传统结构的 427 V 提高到新型结构的 960 V. 并且由于沟道 2DEG 的完全耗尽, 在器件漏电极边缘出现了新的电场峰.

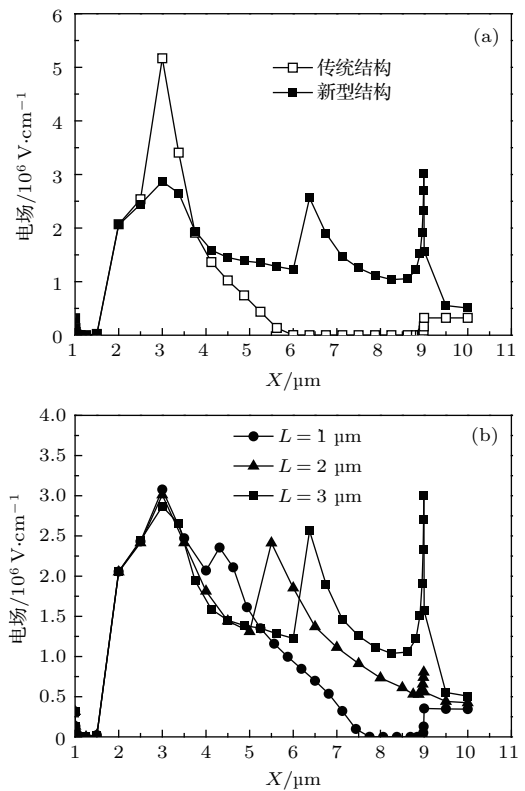


图 3 击穿条件下的 AlGaIn/GaN HEMTs 器件表面电场分布 (a) 传统结构与新型结构的比较; (b) 新型结构随 L 参数的变化: $T = 228 \text{ nm}$
Fig. 3. Surface electric field distributions of AlGaIn/GaN HEMTs under breakdown conditions: (a) Comparison of the conventional and novel structure; (b) variation of surface electric field distributions with L of the novel structure: $T = 228 \text{ nm}$.

图 3(b) 为具有部分本征 GaN 帽层新型 AlGaIn/GaN HEMTs 器件表面电场分布随部分本征 GaN 帽层长度的变化. 可以看出, 随着部分本

征 GaN 帽层长度的增加, 新电场峰值逐渐提高, 位置逐渐向漏电极处移动, 并且栅边缘的高峰电场逐渐降低. 这是由于随着部分本征 GaN 帽层长度的增加, 电场调制效应增强, 沟道低浓度 2DEG 区域延长, 2DEG 耗尽区扩展并达到了完全耗尽. 当部分本征 GaN 帽层的长度为 $1\ \mu\text{m}$ 时, 与传统结构相比, 漂移区的沟道 2DEG 耗尽区有所扩展, AlGaN/GaN HEMTs 器件的击穿电压为 661 V; 当部分本征 GaN 帽层的长度为 $2\ \mu\text{m}$ 时, 漂移区的沟道 2DEG 达到了完全耗尽, 器件的击穿电压为 880 V; 当部分本征 GaN 帽层的长度为 $3\ \mu\text{m}$ 时, 完全耗尽后的沟道 2DEG 使漏电极边缘出现电场峰, 此时由于栅边缘高电场峰进一步降低, 器件的击穿电压进一步提高到 960 V.

对于具有部分本征 GaN 帽层的新型 AlGaN/GaN HEMTs 器件, 影响击穿电压的主要参数为部分本征 GaN 帽层的长度和厚度, 这与功率器件传统终端技术中的场板规律类似^[5]. 不同的部分本征 GaN 帽层的长度和厚度, 导致产生的新电场峰的值和位置不同, 进而对栅边缘高峰电场降低程度的影响不同. 如图 4(a) 所示, 当部分本征 GaN 帽层的厚度固定时, 随着其长度的增加, 靠近栅边缘的沟道中低浓度 2DEG 区域延长, 形成的新电场峰使栅边缘高电场峰的降低程度增加, AlGaN/GaN HEMTs 器件的击穿电压增大. 当部分本征 GaN 帽层厚度固定为 228 nm、部分本征 GaN 帽层的长度为栅漏间距的一半时, AlGaN/GaN HEMTs 器件的击穿电压从传统结构的 427 V 提高到 960 V, 增量为 125%; 当部分本征 GaN 帽层的长度大于栅漏间距的一半, 漏电极边缘出现新的电场峰, 击穿电压增加速度减慢, 趋于饱和. 同样地, 当部分本征 GaN 帽层的厚度为 30, 10 nm 时, 如图 4(a) 所示, AlGaN/GaN HEMTs 器件击穿电压的变化表现出相似的规律.

如图 4(b) 所示, 当部分本征 GaN 帽层的长度固定为 $3\ \mu\text{m}$ 时, 随着部分本征 GaN 帽层厚度的增加, 沟道 2DEG 浓度降低并逐渐饱和, 因此 AlGaN/GaN HEMTs 器件的击穿电压逐渐增加并保持不变. 这是由于在器件反向工作时, 在较低漏压下就可以很容易地将沟道低浓度的 2DEG 完全耗尽, 使器件可以在更高反向电压下扩展耗尽沟道 2DEG 而提高击穿电压.

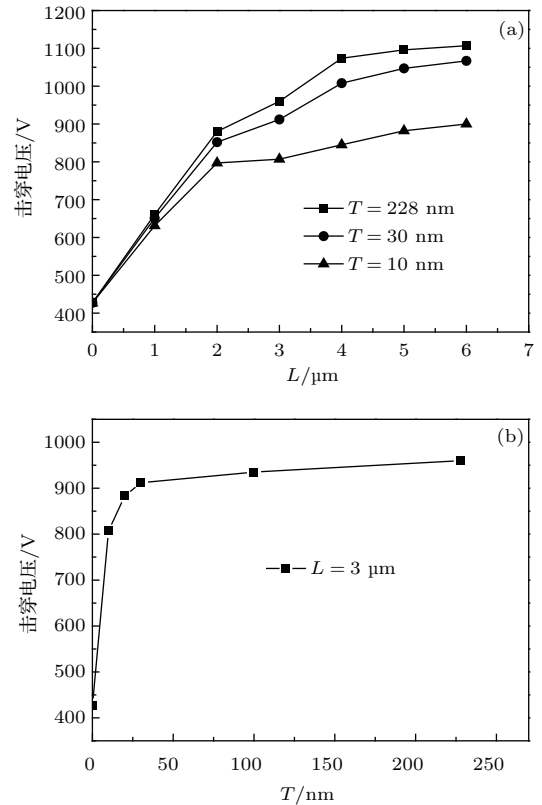


图 4 新型结构击穿电压与部分本征 GaN 帽层参数的关系 (a) 击穿电压随 L 参数的变化: $T = 228, 30, 10\ \text{nm}$; (b) 击穿电压随 T 参数的变化: $L = 3\ \mu\text{m}$
 Fig. 4. Relationship of breakdown voltage with parameters of the partial GaN cap layer: (a) Breakdown voltage dependence on L : $T = 228, 30, \text{ and } 10\ \text{nm}$; (b) breakdown voltage dependence on T : $L = 3\ \mu\text{m}$.

图 5(a) 所示为传统结构与具有部分本征 GaN 帽层新型结构的转移特性曲线的比较. 由于在栅边缘到漏电极的漂移区之间引入了部分本征帽层, 降低了栅边缘到漏电极之间沟道 2DEG 的浓度, 而 AlGaN/GaN HEMTs 器件的阈值电压仅仅与栅下电极覆盖区域有关, 因此新型结构的阈值电压与传统结构相比并没有明显差异. 在最优参数条件下 ($T = 228\ \text{nm}$, $L = 3\ \mu\text{m}$), 传统器件的阈值电压为 $-2.6\ \text{V}$, 新型器件的阈值电压为 $-2.4\ \text{V}$.

图 5(b) 所示为传统结构与具有部分本征 GaN 帽层新型结构的输出特性曲线的比较. AlGaN/GaN HEMTs 器件的最大输出电流与沟道 2DEG 的浓度和迁移率成正比. 部分本征 GaN 帽层的存在, 在降低沟道 2DEG 浓度的同时, 提高了 2DEG 的迁移率^[22]. 在最优参数条件下 ($T = 228\ \text{nm}$, $L = 3\ \mu\text{m}$), AlGaN/GaN HEMTs 器件的最大输出电流从传统结构的 $870\ \text{mA}/\text{mm}$ 降低到新型结构的 $790\ \text{mA}/\text{mm}$, 减小了 9.2%. 通过图 5(b) 可

以计算获得 AlGaIn/GaN HEMTs 新型结构的比导电电阻为 $0.65 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 传统结构的比导电电阻为 $0.58 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$, 增大了 11% 左右, 相比击穿电压提高了 125%, 比导电电阻的增大幅度是可以接受的. 这是提高 AlGaIn/GaN HEMTs 器件击穿电压的折中结果.

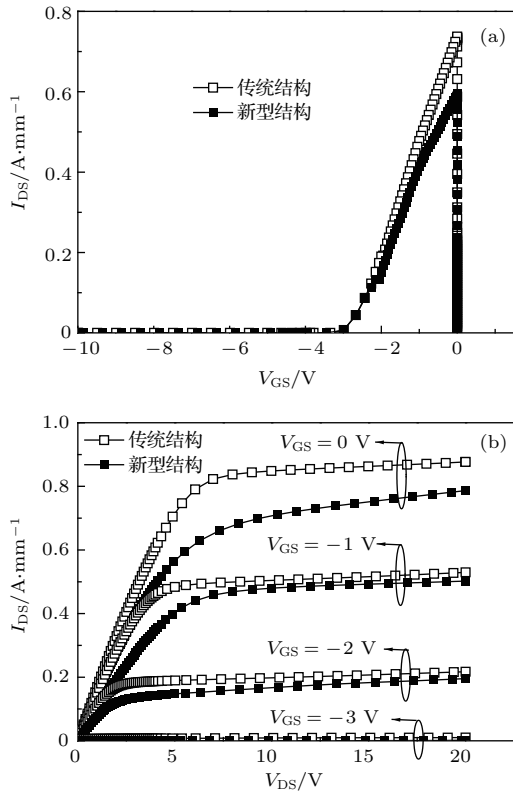


图 5 传统结构与新型结构的正向特性曲线的比较 (a) 转移特性; (b) 输出特性

Fig. 5. Comparison of forward characteristic curves between the conventional and novel structure: (a) Transfer characteristic; (b) output characteristic.

图 6 为传统结构与具有部分本征 GaN 帽层新型结构的栅源电容 C_{GS} 随频率的变化关系. 可以看出, 在低频段时, 新型结构的栅源电容值比传统结构有所减小. 新型结构的栅源电容为 $3.32 \text{ pF}/\text{mm}$, 相比传统结构的 $3.69 \text{ pF}/\text{mm}$, 减小了 10%. 由于引入了部分本征 GaN 帽层, 降低了沟道 2DEG 的浓度, 相应地降低了空间电荷区的电荷密度, 因此新型结构在低频段时拥有比传统结构更小的栅源电容. 在频率达到一定程度后, 器件的栅源电容开始急剧下降至最低值附近, 从图 6 可以获得, 当工作频率增大到 1 THz 时, 新型结构和传统结构的栅源电容分别减小至 77.5 和 $82.3 \text{ fF}/\text{mm}$.

为了得到 AlGaIn/GaN HEMTs 器件的截止频率和最大振荡频率, 采用二端口网络进行小信号

S 参数仿真, 图 7 所示为传统结构与具有部分本征 GaN 帽层新型结构的小信号高频特性的比较结果. H_{21} 为小信号电流增益, UPG 为单向功率增益, AlGaIn/GaN HEMTs 器件的直流偏置条件为 $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $V_{DS} = 20 \text{ V}$. 从图 7 中可以看出, 当 H_{21} 下降到 0 dB 时, 新型结构拥有与传统结构几乎一样的截止频率, 分别为 15 和 12 GHz. 这是因为截止频率与栅源电容成反比, 与跨导成正比. 由于部分本征帽层带来的影响, 使得器件跨导的下降程度与栅源电容的减小程度相抵消, 所以新型结构的截止频率基本未发生改变. 而当 UPG 下降到 0 dB 时, 新型结构和传统结构的最大振荡频率分别为 65 和 58 GHz, 增加了约 12%. 在截止频率未改变的情况下, 由于部分本征 GaN 帽层的存在, 降低了沟道 2DEG 浓度, 增加了沟道电阻, 因此最大振荡频率有所提高.

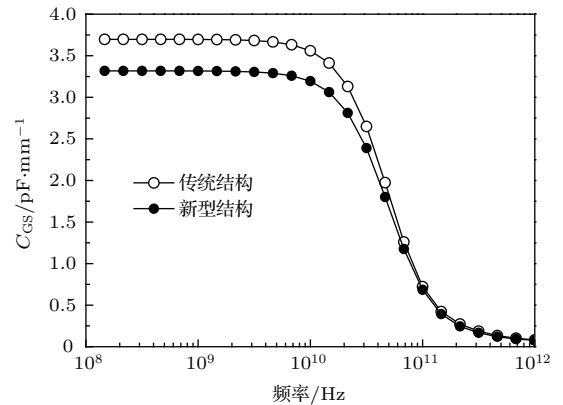


图 6 传统结构与新型结构的栅源电容随频率的变化
Fig. 6. Variation of C_{GS} with frequencies of the conventional and novel AlGaIn/GaN HEMTs.

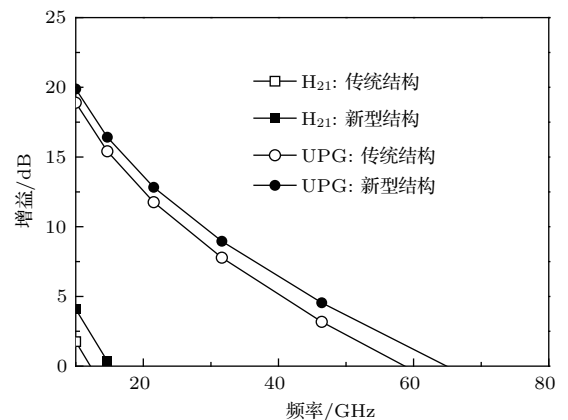


图 7 传统结构与新型结构的小信号高频特性曲线
Fig. 7. Small signal high-frequency characteristic curves of the conventional and novel AlGaIn/GaN HEMTs.

4 结 论

本文提出了一种具有部分本征 GaN 帽层新型 AlGa_N/GaN HEMTs 器件结构. 在 AlGa_N 势垒层顶部, 栅漏漂移区之间引入部分本征 GaN 帽层, 降低了沟道 2DEG 的浓度, 形成了低浓度 2DEG 区域, 低浓度的 2DEG 使沟道耗尽区扩展直至完全耗尽. 利用电场调制效应, 产生了新的电场峰, 有效降低了栅边缘的高峰电场, AlGa_N/GaN HEMTs 器件的表面电场分布更加均匀, 击穿电压从传统结构的 427 V 提高到了新型结构的 960 V. 由于沟道 2DEG 浓度减小, 沟道电阻增加, 新型 AlGa_N/GaN HEMTs 器件的输出电流略有减小, 截止频率几乎保持不变, 而最大振荡频率有所提高.

参考文献

- [1] Tham W H, Ang D S, Bera L K, Dolmanan S B, Bhat T N, Lin V K, Tripathy S 2016 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **63** 345
- [2] Ambacher O, Smart J, Shealy J R, Weimann N G, Chu K, Murphy M, Schaff W J, Eastman L F, Dimitrov R, Wittmer L, Stutzmann M, Rieger W, Hilsenbeck J 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 3222
- [3] Yu E T, Dang X Z, Asbeck P M, Lau S S, Sullivan G J 1999 *J. Vac. Sci. Technol. B* **17** 1742
- [4] Huang X, Liu Z, Li Q, Lee F C 2014 *IEEE Trans. Power Electron.* **29** 2453
- [5] Karmalkar S, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **48** 1515
- [6] Okamoto Y, Ando Y, Nakayama T, Hataya K, Miyamoto H, Inoue T, Senda M, Hirata K, Kosaki M, Shibata N, Kuzuhara M 2004 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **51** 2217
- [7] Saito W, Kuraguchi M, Takada Y, Tsuda K, Omura I, Ogura T 2005 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **52** 106
- [8] Wong J, Shinohara K, Corrion A L, Brown D F, Carlos Z, Williams A, Tang Y, Robinson J F, Khalaf I, Fung H, Schmitz A, Oh T, Kim S, Chen S, Burnham S, Margomenos A, Micovic M 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 95
- [9] Karmalkar S, Deng J, Shur M S 2001 *IEEE Electron Dev. Lett.* **22** 373
- [10] Nanjo T, Imai A, Suzuki Y, Abe Y, Oishi T, Suita M, Yagyū E, Tokuda Y 2013 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **60** 1046
- [11] Song D, Liu J, Cheng Z, Tang W C W, Lau K M, Chen K J 2007 *IEEE Electron Dev. Lett.* **28** 189
- [12] Kato S, Satoh Y, Sasaki H, Masayuki I, Yoshida S 2007 *J. Cryst. Growth* **298** 831
- [13] Polyakov A Y, Smirnov N B, Govorkov A V, Yugova T G, Markov A V, Dabiran A M, Wowchak A M, Cui B, Xie J, Osinsky A V, Chow P P, Pearton S J 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 042110
- [14] Hirose M, Takada Y, Tsuda K 2012 *Phys. Stat. Sol. C* **9** 361
- [15] Treidel E B, Hilt O, Brunner F, Würfl J, Tränkle G 2008 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **55** 3354
- [16] Udrea F, Popescu A, Milne W I 1998 *Electron. Lett.* **34** 808
- [17] Duan B X, Yang Y T, Zhang B 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 305
- [18] Duan B X, Yang Y T 2012 *Sci. China: Inf. Sci.* **55** 473
- [19] Duan B X, Yang Y T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 057201
- [20] Duan B X, Yang Y T, Chen J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 247302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂, 陈敬 2012 物理学报 **61** 247302]
- [21] Duan B X, Yang Y T 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 057302 (in Chinese) [段宝兴, 杨银堂 2014 物理学报 **63** 057302]
- [22] Heikman S, Keller S, Wu Y, Speck J S, Denbaars S P, Mishra U K 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 10114
- [23] Baliga B J 2008 *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* (New York: Springer) pp1-2

Characteristic analysis of new AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor with a partial Ga_N cap layer*

Guo Hai-Jun Duan Bao-Xing[†] Yuan Song Xie Shen-Long Yang Yin-Tang

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

(Received 11 April 2017; revised manuscript received 5 June 2017)

Abstract

In order to reduce the high electric field peak near the gate edge and optimize the non-uniform surface electric field distribution of conventional AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor (HEMT), a novel AlGa_N/Ga_N HEMT with a partial Ga_N cap layer is proposed in this paper. The partial Ga_N cap layer is introduced at the top of the AlGa_N barrier layer and is located from the gate to the drain drift region. A negative polarization charge at the upper hetero-junction interface is induced, owing to the polarization effect at the Ga_N cap layer and AlGa_N barrier layer interface. Hence, the two dimensional electron gas (2DEG) density is reduced. The low-density 2DEG region near the gate edge is formed, which turns the uniform distribution into a gradient distribution. The concentration distribution of 2DEG is modified. Therefore, the surface electric field distribution of AlGa_N/Ga_N HEMT is modulated. By the electric field modulation effect, a new electric field peak is produced and the high electric field peak near the gate edge of the drain side is effectively reduced. The surface electric field of AlGa_N/Ga_N HEMT is more uniformly redistributed in the drift region. In virtue of ISE-TCAD simulation software, the equipotential and the surface electric field distribution of AlGa_N/Ga_N HEMT are obtained. For the novel AlGa_N/Ga_N HEMT employing a partial Ga_N cap layer, the 2DEG is completely depleted from the gate to the drain electrodes, arising from the low-density 2DEG near the gate edge, while the 2DEG is partly depleted for the conventional AlGa_N/Ga_N HEMT. The surface electric field distribution of the conventional structure is compared with the one of the novel structures with partial Ga_N cap layers of different lengths at a fixed thickness of 228 nm. With increasing length, the new electric field peak increases and shifts toward the drain electrode, and the high electric field peak on the drain side of the gate edge is reduced. Moreover, the breakdown voltage dependence on the length and thickness of the partial Ga_N cap layer is achieved. The simulation results exhibit that the breakdown voltage can be improved to 960 V compared with 427 V of the conventional AlGa_N/Ga_N HEMT under the optimum conditions. The threshold voltage of AlGa_N/Ga_N HEMT remains unchanged. The maximum output current of AlGa_N/Ga_N HEMT is reduced by 9.2% and the specific on-resistance is increased by 11% due to a 2DEG density reduction. The cut-off frequency keeps constant and the maximum oscillation frequency shows an improvement of 12% resulting from the increased output resistance. The results demonstrate that the proposed AlGa_N/Ga_N HEMT is an attractive candidate in realizing the high-voltage operation of Ga_N-based power device.

Keywords: high electron mobility transistors, electric field modulation, two dimensional electron gas, breakdown voltage

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

DOI: 10.7498/aps.66.167301

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2014CB339900, 2015CB351900) and the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61234006, 61334002).

[†] Corresponding author. E-mail: bxduan@163.com