

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.008

# 基于超晶格结构的高电流密度 增强型 AlGaIn/GaN HEMT

夏元治, 吴春艳, 周世刚, 钱君涵, 于永强

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 凹槽栅是实现增强型 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistor, HEMT)的常见技术,但随着栅下 AlGaIn 的刻蚀,极化效应减弱,二维电子气(two-dimensional electron gas, 2DEG)浓度降低,电流密度显著降低。文章提出在凹槽栅金属-绝缘层-半导体(metal-insulator-semiconductor, MIS)结构栅下叠加 4 nm GaN 和 1 nm AlN 超晶格(superlattice, SL)结构,通过在 AlGaIn 与 GaN 之间引入一层超晶格层、增加一层二维电子气沟道来提高电流密度,并利用 Silvaco TCAD 软件系统仿真凹槽深度、栅介质以及超晶格层对器件电流密度的影响。仿真结果表明:使用 5 nm HfO<sub>2</sub> 栅介质层并增加一层超晶格层(4 nm GaN+1 nm AlN)的 AlGaIn/GaN SL-MISHEMT, 阈值电压  $V_{th}$  为 0.14 V, 电流密度  $I_{ds}$  达到 1 014 mA/mm( $V_{ds}=10$  V,  $V_{gs}=10$  V);与常规 AlGaIn/GaN HEMT( $V_{th}=-3.16$  V)相比,器件阈值电压增加了 3.28 V;与无超晶格层的 AlGaIn/GaN MISHEMT 相比,电流密度提高了 24%。

**关键词:** AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管(HEMT); 凹槽栅; 超晶格(SL); 功率器件仿真

**中图分类号:** TN386.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)10-1352-05

## High-current-density enhancement-mode AlGaIn/GaN HEMT based on superlattice structure

XIA Yuanzhi, WU Chunyan, ZHOU Shigang, QIAN Junhan, YU Yongqiang

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The recessed gate is a common technique for achieving enhancement-mode AlGaIn/GaN high electron mobility transistor(HEMT). However, as the etching of the underlying AlGaIn progresses, the polarization effect will be weakened, leading to a decrease in two-dimensional electron gas(2DEG) concentration and a significant reduction in current density. This paper proposes a recessed gate metal-insulator-semiconductor(MIS) structure with a superlattice(SL) layer under the gate. By introducing a 4 nm GaN/1 nm AlN SL layer between AlGaIn and GaN, an additional layer of 2DEG channel is added to improve the electron density. Effects of recessed depth, gate medium and SL layer on device current density were simulated by using Silvaco TCAD software. The results reveal that for an AlGaIn/GaN SL-MISHEMT featuring a 5 nm HfO<sub>2</sub> gate dielectric layer and a SL layer(4 nm GaN/1 nm AlN), the threshold voltage  $V_{th}$  is 0.14 V, while the current density  $I_{ds}$  reaches 1 014 mA/mm ( $V_{ds}=10$  V,  $V_{gs}=10$  V). The threshold voltage is increased by 3.28 V when compared to a conventional AlGaIn/GaN HEMT( $V_{th}=-3.16$  V), and the current density is increased by 24% when compared to AlGaIn/GaN MISHEMT without SL layers.

**Key words:** AlGaIn/GaN high electron mobility transistor(HEMT); recessed gate; superlattice(SL);

收稿日期:2024-02-05;修回日期:2024-03-23

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085MF177)

作者简介:夏元治(1999—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

吴春艳(1978—),女,安徽石台人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:cywu@hfut.edu.cn.

power device simulation

## 0 引言

AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 由于高电子迁移率、高电子饱和速度、高击穿电压<sup>[1]</sup>等特性,在智能终端充电、音频放大、电动汽车与混合动力汽车的转换器以及可再生能源的逆变器等方面有着显著的应用优势<sup>[2-3]</sup>。由于自发极化和压电极化,AlGaIn/GaN 异质结界面形成高浓度的二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG), 常规结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件是耗尽型 (常开型) 器件,在实际应用中需要提供额外的负压来驱动电路,这大大提高了电路设计的难度,也会增加整个电路的功耗,降低系统的稳定性和可靠性<sup>[4-5]</sup>。因此,增强型 (常关型) AlGaIn/GaN HEMT 的设计备受关注。

凹槽栅是实现增强型 AlGaIn/GaN HEMT 的一种典型技术,通过精确刻蚀栅极下方 AlGaIn 势垒层有效耗尽 2DEG,可实现正向阈值电压。这一技术通常与金属-绝缘层-半导体 (metal-insulator-semiconductor, MIS) 结构结合,在凹槽栅与沟道之间使用一层介质层,减小栅极漏电流<sup>[6-7]</sup>。然而,随着 2DEG 的耗尽,沟道迁移率显著下降,器件饱和电流密度和输出功率密度也显著降低。

针对以上问题,本文提出在凹槽栅 AlGaIn/GaN MISHEMT 下插入 GaN/AlN 超晶格 (superlattice, SL),在维持击穿特性的同时显著提升沟道电子迁移率,解决电流密度过低的问题,实现增强型器件电流密度的提升<sup>[8-10]</sup>。Silvaco TCAD 仿真结果显示,增加一层 4 nm GaN 和 1 nm AlN 超晶格的 AlGaIn/GaN SL-MISHEMT,阈值电压仍能够达到 0.14 V,为增强型器件,漏极饱和电流达到 1 014 mA/mm (漏源电压  $V_{ds} = 10$  V,栅源电压  $V_{gs} = 10$  V),实现器件的常关。

本文设计的 SL-MISHEMT 与 p-GaN HEMT<sup>[11]</sup>相比,有更大的饱和电流密度和更强的栅控能力;与凹槽栅及凹槽栅 MISHEMT 相比,依然具有更大的饱和电流密度;与 Cascode 结构相比,具有更小的寄生参数、更快的开关速度和更小的器件体积<sup>[12]</sup>。

## 1 仿真参数与模型

拟仿真的 AlGaIn/GaN HEMT 结构和参数

如图 1 所示。采用迁移率模型 (Albrct、GaNsat)、极化模型 (Polarization)、载流子复合模型 (Consrh、Auger)、载流子统计分布模型 (Fermi-Dirac)<sup>[13]</sup>等仿真器件性能,其中极化模型用来模拟 AlGaIn/GaN 异质结中的极化效应。仿真反向击穿特性时,还需加入碰撞电离模型 (Selberherr impact)。仿真过程中采用 Newton 迭代法进行数值计算,当  $I_{ds} = 10 \mu\text{A}/\text{mm}$  时判断器件开启,关态下,当  $I_{ds} = 1 \text{ mA}/\text{mm}$  时判断器件击穿<sup>[14]</sup>。

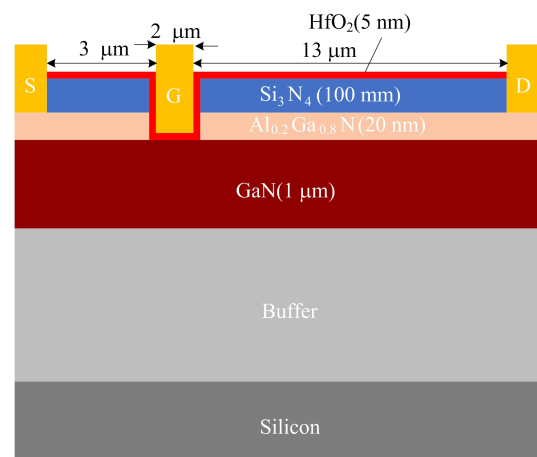


图 1 凹槽结构 AlGaIn/GaN HEMT 示意图

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 凹槽栅 AlGaIn/GaN MISHEMT 性能仿真

凹槽栅 AlGaIn/GaN HEMT 阈值电压  $V_{th}$  和击穿电压  $V_B$  随刻蚀深度  $d$  变化的曲线如图 2 所示。

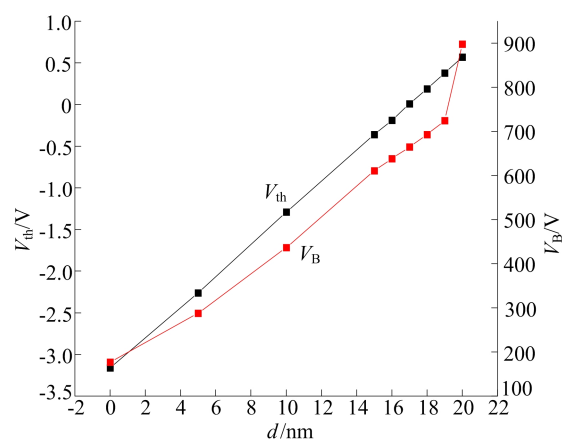


图 2 凹槽结构 AlGaIn/GaN HEMT 的  $V_{th}$  和  $V_B$  随  $d$  变化的曲线

从图 2 可以看出,器件阈值电压  $V_{th}$  随刻蚀深度  $d$  的增加而增大。这是由于随着刻蚀深度的增加,栅 AlGaIn 势垒层厚度减小,极化效应减弱,2DEG 浓度降低<sup>[15]</sup>。当刻蚀深度大于 17 nm 时,阈值电压变为正值,实现增强型 HEMT 器件。

从图 2 还可以看出,器件击穿电压  $V_B$  也随刻蚀深度  $d$  的增加而增大。这是由于随着刻蚀深度的增加,器件的耗尽区宽度扩展,栅极与耗尽区边缘的距离会增加,从而分散了栅极靠近漏极一侧的电场峰值,提高了击穿电压<sup>[16]</sup>。

当栅下 AlGaIn 势垒层全部刻蚀后,器件的阈值电压  $V_{th}$  和击穿电压  $V_B$  分别达到最大值 0.59 V 和 898 V。

AlGaIn/GaN HEMT 转移特性曲线与栅极电流的曲线如图 3 所示。

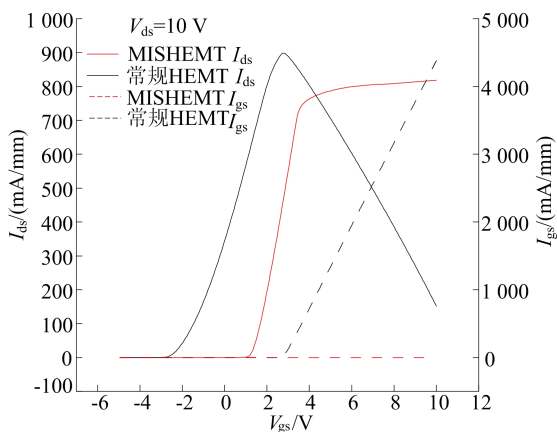


图 3 AlGaIn/GaN HEMT 转移特性曲线和栅极电流

由图 3 可知,常规 HEMT 在栅源电压  $V_{gs}$  为 2.8 V 时漏极电流  $I_{ds}$  达到最大值 899 mA/mm,之后随着  $V_{gs}$  的增大,  $I_{ds}$  迅速下降,这是由于当  $V_{gs}$  达 2.8 V 以后,栅极泄漏电流  $I_{gs}$  显著增大,因此常规 HEMT 器件所允许的栅压范围较小。为了解决这一问题,在栅极与势垒层之间插入绝缘介质层,形成金属-绝缘层-半导体 MIS 结构,以增加栅下区域势垒的高度,降低栅极泄漏电流,提高器件栅压的工作范围,并改善器件的击穿特性<sup>[17-18]</sup>。高  $k$  介质材料由于具有更大的物理厚度,可显著降低栅极泄漏电流<sup>[19]</sup>。因此,本文增加 5 nm  $HfO_2$  ( $\epsilon = 25$ ),构建 AlGaIn/GaN MISHEMT 结构,从图 3 可以看出,随着栅极电压的升高,MISHEMT 器件没有明显的栅极泄漏电流,因此漏极电流逐渐饱和后维持恒定,表明  $HfO_2$  层的加入很好地解决了器件栅极泄漏的问题。但是器件的饱和电流密度由 899 mA/mm

(常规 HEMT)降低到 818 mA/mm (MISHEMT),这是由 MISHEMT 的凹槽刻蚀后极化效应减弱导致的。

为了进一步提高器件电流密度,提升器件性能,本文引入超晶格结构。

## 2.2 超晶格结构性能仿真

为提高 AlGaIn/GaN MISHEMT 正向饱和电流密度,在 AlGaIn 势垒层下方引入 GaN/AlN 超晶格 SL 结构,构建 AlGaIn/GaN SL-MISHEMT 结构,以增强沟道电子浓度,提升电子迁移率。AlGaIn/GaN SL-MISHEMT 结构示意图如图 4 所示。

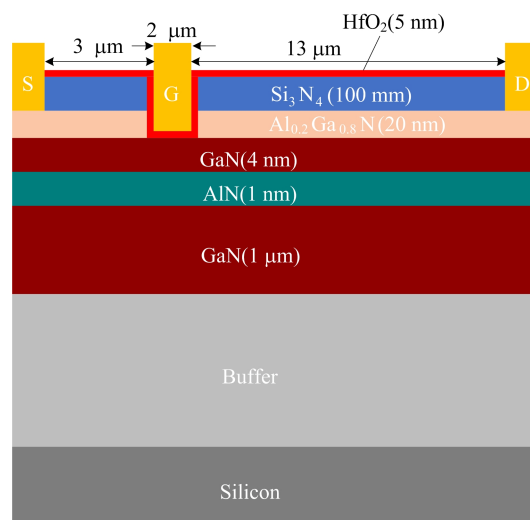
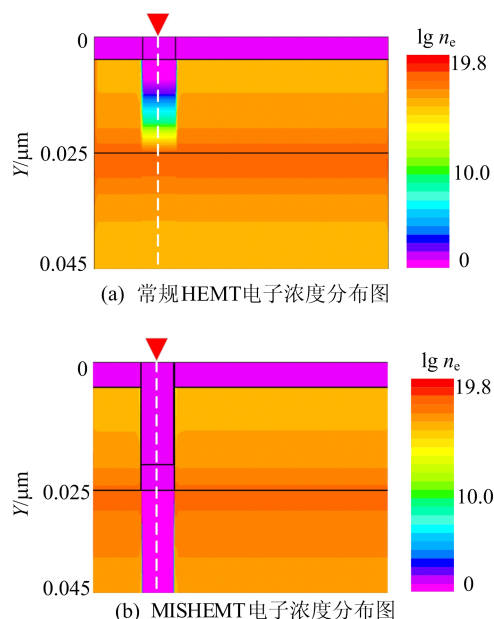


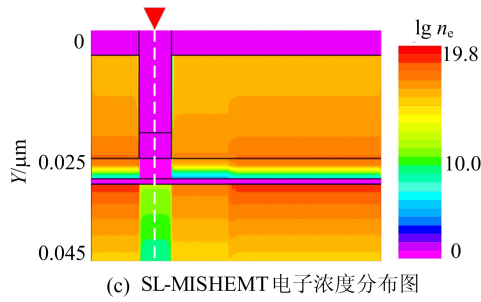
图 4 AlGaIn/GaN SL-MISHEMT 结构示意图

AlGaIn/GaN 异质结和 GaN/AlN/GaN 超晶格电子浓度如图 5 所示。

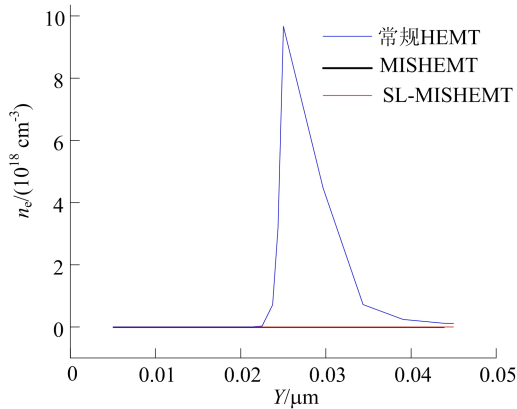


(a) 常规HEMT电子浓度分布图

(b) MISHEMT电子浓度分布图



(c) SL-MISHEMT电子浓度分布图



(d) 图5a~图5c沿虚线方向电子浓度曲线

图 5 AlGaIn/GaN 异质结和 GaN/AlN/GaN 超晶格电子浓度分布及沿虚线方向电子浓度曲线

由图 5 可知:常规 HEMT 肖特基势垒不能完全耗尽栅下 2DEG,因此器件为耗尽型;MISHEMT 栅下 GaN 层中电子几乎耗尽,这将增大器件的导通电阻,降低饱和电流密度;增加一层超晶格层(4 nm GaN+1 nm AlN)的 SL-MISHEMT,栅下 GaN 层中电子浓度  $n_e$ (单位体积里的电子数)由  $0.03 \text{ cm}^{-3}$  增加到  $1.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,有望改善器件的饱和电流密度。

采用不同超晶格结构时器件转移特性曲线如图 6 所示。

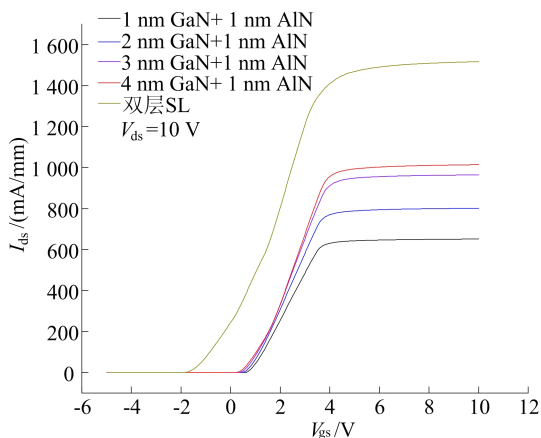


图 6 GaN/AlN/GaN SL-MISHEMT 转移特性曲线

由图 6 可知,与 AlGaIn/GaN MISHEMT 相比,增加 1 nm GaN 和 1 nm AlN 超晶格后,器件饱和电流密度由 818 mA/mm 降低到 651 mA/mm,这是由于增加 1 nm GaN 和 1 nm AlN 后,虽然栅下 GaN 层中电子浓度有所增加,但其余部分 AlGaIn/GaN(1 nm GaN)的异质结极化效应远低于 AlGaIn/GaN(1 μm GaN)异质结的极化效应,导致整体沟道电子浓度下降。根据极化效应公式<sup>[20]</sup>有:

$$N = Q/V = Q/(SL) = \sigma/L \quad (1)$$

其中: $N$  为 GaN 层掺杂浓度; $Q$  为极化电荷总量; $\sigma$  为 AlGaIn/GaN 界面处极化引起的电荷面密度; $V$ 、 $S$ 、 $L$  分别为 GaN 层的体积、面积和厚度。

随着超晶格 GaN 层厚度  $L$  的提升,极化效应增强,极化电荷面密度  $\sigma$  增大。根据文献<sup>[21]</sup>可知,AlGaIn/GaN 异质结产生的 2DEG 厚度大约 5.6 nm,且 2DEG 分布在靠近 GaN 的一侧,因此当 GaN 厚度超过 4 nm 时,极化效应不再显著增加。因此,选择 4 nm GaN+1 nm AlN 的超晶格层,以提升器件的电流密度,如图 6 所示,器件电流密度达到 1 014 mA/mm,值得注意的是,阈值电压由 0.48 V 降低到 0.14 V,这是由于沟道电子浓度提高后,需要更大的栅极负偏压来耗尽沟道电子<sup>[22]</sup>;当栅下采用双层超晶格结构时,饱和电流密度继续由 1 014 mA/mm 增加到 1 516 mA/mm,但随着沟道电子浓度的提升,栅极需要更大的负偏压以耗尽导电通道,器件由增强型转变为耗尽型( $V_{th} = -2.28 \text{ V}$ )。

各种 AlGaIn/GaN HEMT 器件特性的比较见表 1 所列。

表 1 AlGaIn/GaN HEMT 器件性能对比

器件结构	$V_{th}/\text{V}$	$I_{ds}/(\text{mA}/\text{mm})$	$I_{gs}/(\text{mA}/\text{mm})$
常规 HEMT	-3.16	152	4 380
凹槽栅 HEMT	0.59	0.36	4 850
凹槽栅 MISHEMT	0.56	818	0
凹槽栅 SL-MISHEMT	0.14	1 014	0

从表 1 可以看出:采用凹槽栅结构,AlGaIn/GaN HEMT 器件的阈值电压由 -3.16 V 上升到 0.14 V,实现了增强型 HEMT 器件的构筑;增加 5 nm HfO<sub>2</sub> 介质层构建 AlGaIn/GaN MISHEMT,器件栅极泄漏电流由 4 380 mA/mm( $V_{gs} = 10 \text{ V}$ )显著降低至 0,可获得 818 mA/mm 的漏极饱和电流;增加 4 nm GaN 和 1 nm AlN 超晶格后,沟道电子

浓度显著提升,漏极饱和电流提升了 24%,达 1 014 mA/mm。与文献[23]中 30 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为介质层的凹槽栅 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MISHEMT(最大饱和电流密度 905 mA/mm)相比,SL-MISHEMT 的最大饱和电流密度优势明显。

### 3 结 论

本文系统仿真了凹槽栅、介质层及超晶格结构对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件性能的影响,通过介质层抑制栅极漏电流,并采用 Ga<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub> 超晶格提升沟道电子浓度,构筑 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> SL-MISHEMT,实现了增强型 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件,饱和电流密度达 1 014 mA/mm。本文的仿真工作有望为高电流密度增强型 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 的研究提供思路与数据指导。

### [参 考 文 献]

- [1] 郝跃,张金凤,张进成. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件[M]. 北京:科学出版社,2013:1-4.
- [2] SHEN L, HEIKMAN S, MORAN B, et al. AlGa<sub>N</sub>/Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high-power microwave HEMT[J]. IEEE Electron Device Letters, 2001, 22(10): 457-459.
- [3] MENEGHESSO G, VERZELLESI G, DANESIN F, et al. Reliability of Ga<sub>N</sub> high-electron-mobility transistors: state of the art and perspectives[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2008, 8(2): 332-343.
- [4] ROCCAFORTE F, GRECO G, FIORENZA P, et al. An overview of normally-off Ga<sub>N</sub>-based high electron mobility transistors[J]. Materials, 2019, 12(10): 1599.
- [5] HE J, CHENG W C, WANG Q, et al. Recent advances in Ga<sub>N</sub>-based power HEMT devices[J]. Advanced Electronic Materials, 2021, 7(4): 2001045.
- [6] WU J S, LEE C C, WU C H, et al. E-mode Ga<sub>N</sub> MIS-HEMT using ferroelectric charge trap gate stack with low dynamic on-resistance and high V<sub>th</sub> stability by field plate engineering[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(9): 1268-1271.
- [7] LI S, LIU S, ZHANG C, et al. Reliability concern of 650-V normally-OFF Ga<sub>N</sub> devices under reverse freewheeling stress[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(8): 3492-3495.
- [8] KHAN M A, HU X, SUMIN G, et al. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> metal oxide semiconductor heterostructure field effect transistor [J]. IEEE Electron Device Letters, 2000, 21(2): 63-65.
- [9] ASIF K M, SHUR M S, SIMIN G. Strain-engineered novel III-N electronic devices with high quality dielectric/semiconductor interfaces[J]. Physica Status Solidi (a): Applications and Materials Science, 2003, 200(1): 155-160.
- [10] XIAO M, ZHANG W H, ZHANG Y H, et al. Novel 2000 V normally-off MOS-HEMTs using Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> superlattice channel[C]//2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). [S. l.]: IEEE, 2019: 471-474.
- [11] JIANG H X, LYU Q F, ZHU R Q, et al. 1300 V normally-OFF p-Ga<sub>N</sub> gate HEMTs on Si with high ON-state drain current[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 68(2): 653-657.
- [12] 穆昌根,党睿,袁鹏,等. 增强型 Ga<sub>N</sub> HEMT 器件的实现方法与研究进展[J]. 电子与封装, 2022, 22(10): 70-79.
- [13] 李哈溱,宓珉瀚,周雨威,等. Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 毫米波器件结构仿真研究[J]. 空间电子技术, 2023, 20(5): 58-63.
- [14] LIU S, ZHANG W, ZHANG J, et al. Al<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> superlattice channel HEMTs on silicon substrate[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(7): 3296-3301.
- [15] 张明华,林兆军,李惠军,等. 影响 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET 器件二维电子气的若干因素[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(4): 225-229.
- [16] HE Y L, GAO H, WANG C, et al. Comparative study between partially and fully recessed-gate enhancement-mode AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS HEMT on the breakdown mechanism [J]. Physica Status Solidi (a): Applications and Materials Science, 2019, 216(16): 1-6.
- [17] 张佩佩,张辉,张晓东,等. 复合栅介质对 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MISHEMT 器件性能的影响[J]. 半导体技术, 2018, 43(11): 815-822.
- [18] YAGI S, SHIMIZU M, INADA M, et al. High breakdown voltage AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> MIS-HEMT with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and TiO<sub>2</sub> gate insulator[J]. Solid-State Electronics, 2006, 50(6): 1057-1061.
- [19] LIU C, CHOR E F, TAN L S. Enhanced device performance of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTs using HfO<sub>2</sub> high-k dielectric for surface passivation and gate oxide[J]. Semiconductor Science and Technology, 2007, 22(5): 522.
- [20] 李娜,赵德刚,杨辉. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 异质结中极化效应的模拟[J]. 中国科学 G 辑:物理学、力学、天文学, 2004, 34(4): 422-429.
- [21] 雷建明. AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 功率器件的高频动态导通电阻和损耗模型研究[D]. 南京:南京大学, 2020.
- [22] WEI J, LIU S, LI B, et al. Low on-resistance normally-off Ga<sub>N</sub> double-channel metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2015, 36(12): 1287-1290.
- [23] ZHAO Y P, WANG C, ZHENG X F, et al. Comparative study on characteristics of Si-based AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> recessed MIS-HEMTs with HfO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate insulators [J]. Chinese Physics B, 2020, 29(8): 087304.

(责任编辑 胡亚敏)