

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.007

漏场板提升增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 击穿电压的研究

周世刚, 于永强, 夏元治, 钱君涵, 吴春艳

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: p-GaN 帽层增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 存在背势垒, 因此可显著降低 GaN 缓冲层泄漏电流, 提升器件击穿电压, 但会面临漏极下方电场强度峰值集中的问题, 导致击穿电压偏离。文章通过 Silvaco ATLAS 仿真, 探讨漏场板结构和漏场板下钝化层厚度对 p-GaN 帽层增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 器件击穿电压的调制, 优化漏极下方电场强度峰值分布。结果表明: 漏场板的引入可显著提升器件的击穿电压, 漏场板厚度在 0.10~1.10 μm 范围时, 器件的击穿电压随着漏场板厚度增大而增大; 随着漏场板下方钝化层厚度的增大, 漏场板边缘下方的沟道电场强度峰值减小, 漏极下方的沟道电场强度峰值增大, 当漏场板下方钝化层厚度增厚至 0.25 μm 时, 沟道电场强度峰值最小, 器件的击穿电压提升至 1 370 V, 增幅达 53.6%。研究发现, 击穿电压的提升主要是由于漏场板的电场调制效应降低了电场强度峰值。

关键词: p-GaN 帽层增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT; 漏场板; 钝化层; 击穿电压; 电场强度

中图分类号: TN386.6

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)05-0622-06

Breakdown voltage of enhancement-mode AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT improved by drain field plate structure

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

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

Abstract: Owing to the presence of back barrier of the p-GaN cap layer enhancement-mode AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT, the leakage current in GaN buffer layer can be significantly reduced and the breakdown voltage can be improved. However, the breakdown voltage of the device can be seriously decreased due to the concentration of the peak electric field intensity below the drain electrode. The modulation of the breakdown voltage of the p-GaN cap layer enhancement-mode AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT by the structure of the drain field plate and the thickness of the passivation layer below the drain field plate is explored based on Silvaco ATLAS simulation. The distribution of the peak electric field intensity below the drain electrode is optimized. It can be found that the breakdown voltage of the device can be significantly improved by the introduction of the drain field plate. With the increasing of the thickness of the drain field plate in the range of 0.10-1.10 μm , the breakdown voltage increases. With the increasing of the thickness of the passivation layer below the drain field plate, the peak electric field intensity of the channel below the edge of the drain field plate decreases, and the peak electric field intensity of the channel below the drain electrode increases. When the thickness of the passivation layer increases to 0.25 μm , the peak electric field intensity of the channel reaches the minimum value. Significantly, the improved breakdown voltage of the device is approaching to 1 370

收稿日期: 2024-03-04; **修回日期:** 2024-04-23

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2208085MF177)

作者简介: 周世刚(1997—), 男, 安徽合肥人, 合肥工业大学硕士生;

于永强(1979—), 男, 江西进贤人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: yongqiangyu@hfut.edu.cn;

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。

V, showing an increase of 53.6% compared to that of the device without drain field plate structure. The improved breakdown voltage can be attributed to the electric field modulation effect of the drain field plate, which reduces the peak electric field intensity.

Key words: p-GaN cap layer enhancement-mode AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT; drain field plate; passivation layer; breakdown voltage; electric field intensity

作为第三代半导体器件, GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 具有宽禁带、高开关频率、高电子漂移速度、高耐热性、高击穿电场等优点^[1], 在消费电子、新能源汽车应用和 5G 通信等领域都具有很高的研究和应用价值。GaN 材料具有很高的临界击穿电场, 但也面临电极边缘的高电场和 GaN 缓冲层漏电等关键问题, 目前所制备的 HEMT 器件实际耐压值与其理论极限相比尚有距离。因此, 提升 GaN HEMT 器件的击穿电压 V_B 十分必要, 且已成为目前研究的重要方向之一。

当前提升 GaN HEMT 器件击穿电压的方法主要有场板技术、缓冲层掺 Fe 技术^[2]、缓冲层掺 C 技术^[3]、AlGaIn/GaN/AlGaIn 背势垒技术^[4]等。其中, 存在背势垒结构的新型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 器件通过将二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG) 牢牢限制在两势垒之间的三角形势阱中, 使得 GaN 沟道中的 2DEG 不易向缓冲层溢出, 从而显著降低器件的泄漏电流, 提高器件的击穿电压^[5]。

为了实现增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT, 通常引入 p-GaN 帽层结构。但 p-GaN 帽层结构的引入常使得漏极下方的沟道出现电场强度峰值, 影响器件击穿电压的提升^[6]。因此, 本文针对漏极下方沟道出现电场强度峰值问题, 系统地研究漏场板结构和钝化层对增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 击穿电压的影响, 获得提升器件击穿电压性能的优化参数。

1 器件结构和模型

典型的增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 器件结构如图 1 所示, 器件仿真主要参数见表 1 所列。本文使用 Silvaco TCAD 软件中的 ATLAS 器件仿真模块, 采用的物理模型有 SRH 复合模型、Fermi-Dirac 统计模型、晶格加热模型、漂移扩散载流子传输模型、压电极化模型和 Selberherr 碰撞电离模型^[7], 通过求解泊松方程、载流子连续性方程和漂移-扩散传输方程^[8] 获取器件性能参数。

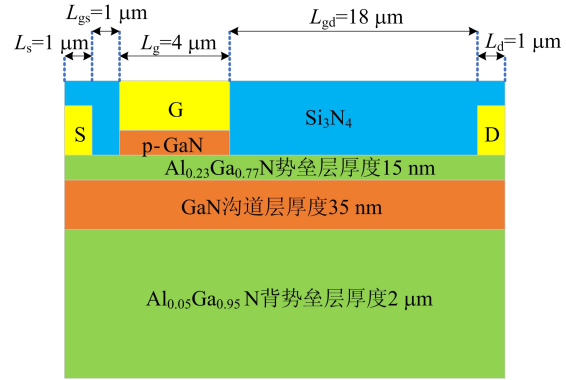


图 1 增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 器件结构示意图

表 1 器件仿真主要参数

参数	数值
Al _{0.05} Ga _{0.95} N 背势垒层厚度/ μm	2
GaN 沟道层厚度/nm	35
Al _{0.23} Ga _{0.77} N 势垒层厚度/nm	15
p-GaN 层厚度/ μm	0.1
Si ₃ N ₄ 钝化层厚度/ μm	0.30
源极长度 (L_s)/ μm	1
栅极长度 (L_g)/ μm	4
漏极长度 (L_d)/ μm	1
栅源间距 (L_{gs})/ μm	1
栅漏间距 (L_{gd})/ μm	18
p-GaN 层的掺杂浓度/ $(10^{17} \text{ cm}^{-3})$	3

在压电极化模型中, 压电极化系数和自发极化系数为 0.67。器件击穿仿真时, Selberherr 碰撞电离模型中 GaN 材料参数设置为 $A_N = 2.98 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$, $B_N = 3.44 \times 10^7 \text{ V/cm}$, $A_P = 2.23 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$, $B_P = 2.70 \times 10^8 \text{ V/cm}$ 。漏电流 I_{ds} ^[9-10] 达到 1 mA/mm 时所对应的电压作为器件的击穿电压值。碰撞电离模型表达式^[11]如下:

$$G = \alpha_n J_n / q + \alpha_p J_p / q \quad (1)$$

$$\alpha_n = A_N \exp(-B_N / E) \quad (2)$$

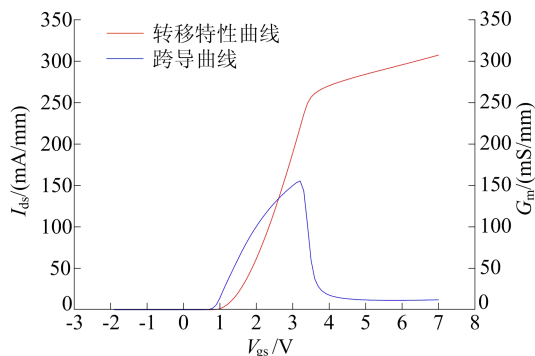
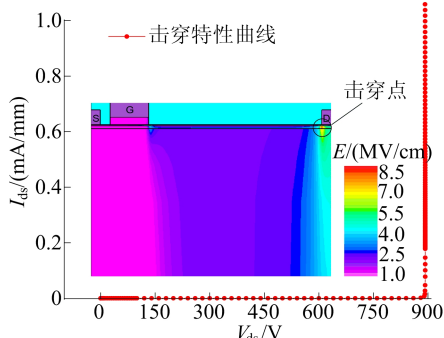
$$\alpha_p = A_P \exp(-B_P / E) \quad (3)$$

其中: G 为电子-空穴对产生率; α_n 为电子电流系数; α_p 为空穴电流系数; J_n 为电子电流密度; J_p 为空穴电流密度; q 为单位电荷量; E 为电场强度; A_N 、 B_N 、 A_P 、 B_P 为拟合参数。

2 仿真结果与讨论

2.1 无漏场板结构的仿真结果

无漏场板结构器件的仿真结果如图 2 所示。

(a) $V_{ds}=15$ V 时转移特性曲线和跨导曲线

(b) 击穿时器件电场分布和击穿特性曲线

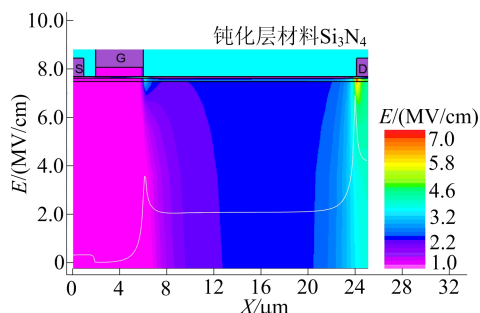
(c) $V_{ds}=800$ V 时器件的电场分布和沟道电场分布曲线

图 2 无漏场板结构器件的仿真结果

图 2a 所示为器件的转移特性曲线和跨导曲线。从图 2a 可以看出,当源漏电压 $V_{ds}=15$ V、器件阈值电压 $V_{th}=0.97$ V 时,跨导 G_m 的最大值为 156 mS/mm。

图 2b 所示为击穿时器件电场分布图和击穿特性曲线。从图 2b 可以看出:当 V_{ds} 达到 892 V 左右,电流迅速升高,器件发生击穿;从电场分布来看,器件击穿点主要位于漏极下方的沟道处。

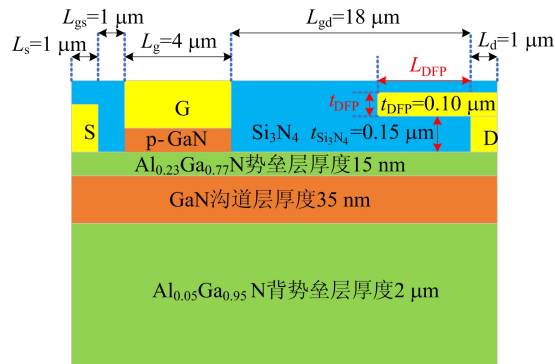
为了更好地分析有、无漏场板情况下,器件在未发生击穿时电场峰值的对比,深入探索漏场板对器件击穿电压的影响,选取接近击穿电压值 $V_{ds}=800$ V 作为对比条件。图 2c 所示为 $V_{ds}=800$ V 时器件的电场分布和沟道电场分布曲线。从图 2c 可以看出,电场强度 E 存在 2 个峰值,分别位于栅极下方和漏极下方,且最大电场强度峰值位于漏极下方沟道,即器件击穿点的位置。因

此,要想提高器件的击穿电压,必须降低器件的最大电场强度峰值。

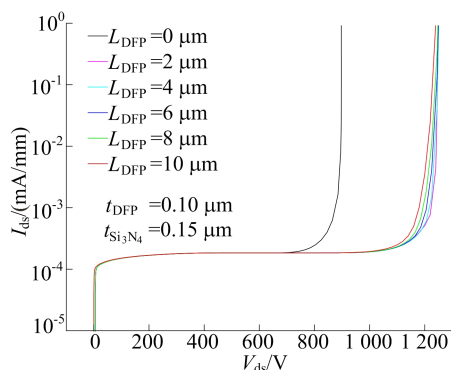
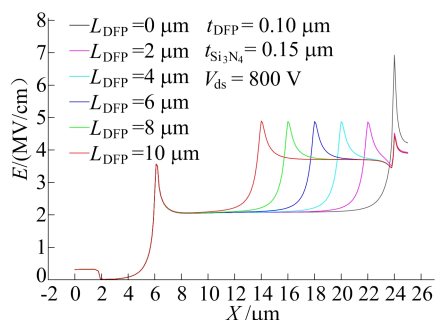
峰值电场集中在漏极下方,这主要与结合 HEMT 的结构特性和工作机理有关。由于 HEMT 器件在关态时漏极承受着高压,随着 V_{ds} 的升高,栅电极靠近漏极一侧沟道里的电子被耗尽,留下带正电的固定电荷,形成耗尽区,并且耗尽区逐渐向漏极延展,栅极靠近漏极一侧的电场强度出现峰值;随着 V_{ds} 的进一步升高,耗尽区延展到漏电极的边缘,漏极下方沟道就会形成电场强度峰值^[12]。

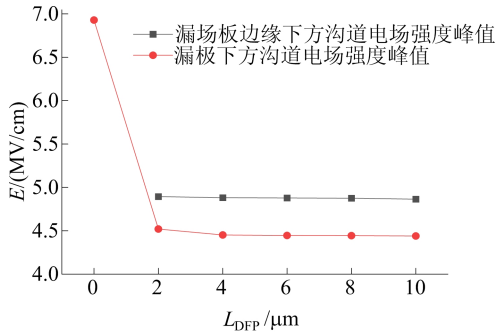
2.2 不同漏场板长度器件的仿真结果

仿真研究过程中, L_{DFP} 被定义为增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 器件漏极漏场板长度,不同 L_{DFP} 器件的仿真结果如图 3 所示。



(a) 漏场板结构器件的结构示意图

(b) 不同 L_{DFP} 器件的击穿特性曲线(c) 不同 L_{DFP} 器件的沟道电场分布曲线



(d) 不同 L_{DFP} 器件的沟道电场强度峰值

图 3 不同 L_{DFP} 器件的仿真结果

图 3a 所示为漏场极结构器件的结构示意图。

不同 L_{DFP} 器件的击穿特性曲线如图 3b 所示,可以看出,漏场板的引入显著提升了器件的击穿电压,但 L_{DFP} 的长短对击穿电压并没有显著影响。当 $V_{gs} = 0 \text{ V}$ 、 $V_{ds} = 800 \text{ V}$ 时不同 L_{DFP} 的沟道电场分布曲线如图 3c 所示,可以看出,漏场板的引入显著降低了器件漏极下方沟道的最大电场强度峰值,此时最大电场强度峰值出现在漏场板边缘下方;提取的电场峰值如图 3d 所示,可以看出,相对于有漏场板结构,无漏场板结构器件的电场强度峰值较高,且 L_{DFP} 对电场强度峰值影响较小。

不同 L_{DFP} 器件的击穿电压、漏极下方沟道电场强度峰值和漏场板边缘下方沟道电场强度峰值见表 2 所列。

从表 2 可以看出,漏场板的引入降低了最大电场强度峰值,并将器件原来的最大电场强度峰值调制为 2 个稍微小的电场强度峰值,且最大电场强度峰值的位置由漏极下方沟道调制到漏场板边缘下方沟道。

表 2 不同 L_{DFP} 器件的击穿电压和沟道电场强度峰值

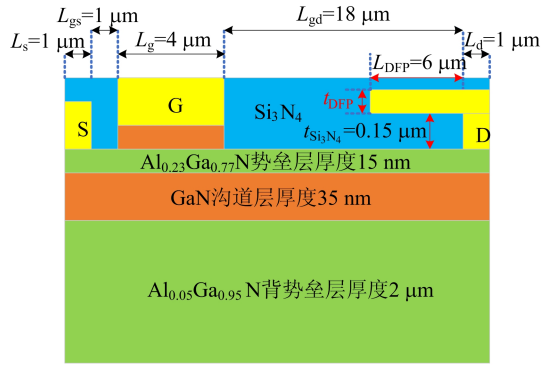
$L_{DFP}/\mu\text{m}$	击穿电压/V	电场强度峰值/(MV/cm)	
		漏极下方沟道	漏场板边缘下方沟道
0	892.0	6.929	
2	1 248.5	4.520	4.894
4	1 245.8	4.451	4.881
6	1 244.5	4.445	4.878
8	1 242.6	4.443	4.875
10	1 240.0	4.439	4.864

结合 HEMT 器件击穿的机理可知,漏场板具有明显的调制作用。当 V_{ds} 足够大时,最大电场强度峰值就会超过 GaN 材料临界击穿电场值^[13],从而导致载流子在该区域碰撞电离,进而发生雪崩击穿。有漏场板结构后,由于漏场板与漏极相连,引入了正电荷,利用这些正电荷施加额

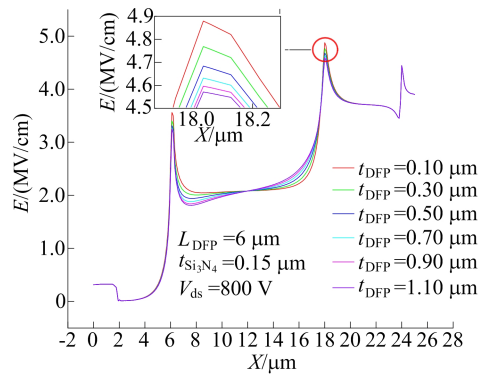
外的电场来调制器件内部电场,场板产生电场调制效应^[14],因此,可以降低漏极下方电场强度峰值,从而提升器件的击穿电压。

2.3 不同漏场板厚度的仿真结果

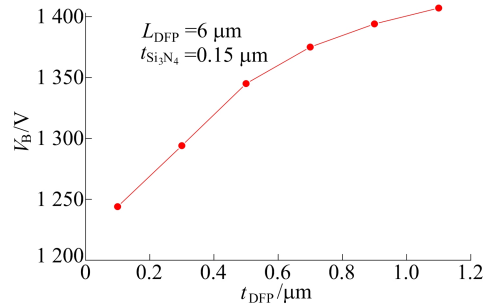
不同漏场板厚度 t_{DFP} 器件的仿真结果如图 4 所示。



(a) 漏场板结构器件结构示意图



(b) 不同 t_{DFP} 器件的沟道电场分布曲线



(c) 不同 t_{DFP} 器件的击穿电压

图 4 不同 t_{DFP} 器件的仿真结果

为研究漏场板厚度对器件击穿电压的影响,结合上述仿真结果,选取 $L_{DFP} = 6 \mu\text{m}$ 、 $t_{Si_3N_4} = 0.15 \mu\text{m}$,此时器件结构示意图如图 4a 所示。

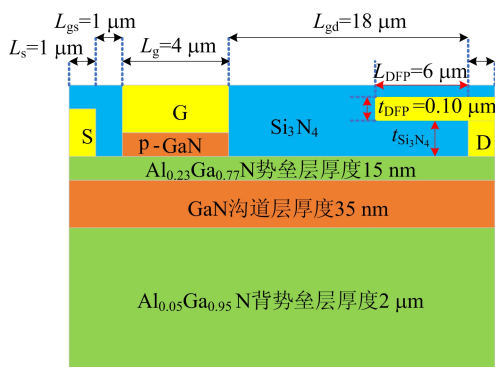
不同 t_{DFP} 器件的沟道电场分布曲线如图 4b 所示,可以看出,在 $V_{gs} = 0 \text{ V}$ 、 $V_{ds} = 800 \text{ V}$ 时,随着 t_{DFP} 的增加,漏场板边缘下方沟道最大电场强度峰值随之越小;从图 4c 可以看出,随着 t_{DFP} 的

增加,击穿电压也增大,且 t_{DFP} 由 $0.10 \mu\text{m}$ 增大到 $1.10 \mu\text{m}$ 的过程中,器件击穿电压持续增大。

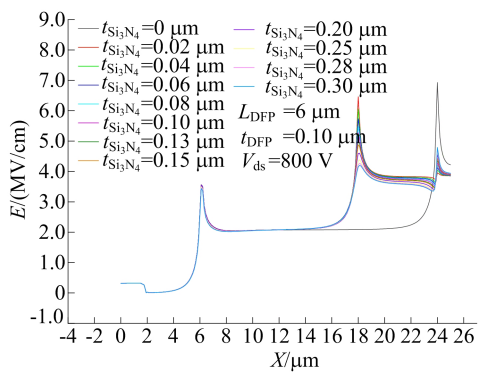
基于上述仿真结果,漏场板的引入产生了电场调制效应。当改变器件的 t_{DFP} ,会导致越厚的 t_{DFP} 器件漏场板纵向方向上的侧壁面积越大,正电荷向侧壁方向移动,使得漏场板上靠近 $\text{Al}_{0.23}\text{Ga}_{0.77}\text{N}$ 势垒层一侧的正电荷数减少,漏场板侧壁面正电荷数增多,而侧壁面离沟道更远。因此,增厚器件的 t_{DFP} 会减小正电荷对沟道电子的影响,降低最大电场强度峰值,进而提高器件的击穿电压^[15]。

2.4 不同漏场板下方钝化层厚度的仿真结果

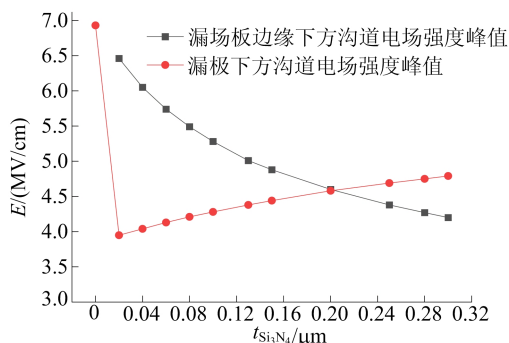
不同漏场板下方钝化层厚度 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的仿真结果如图 5 所示。



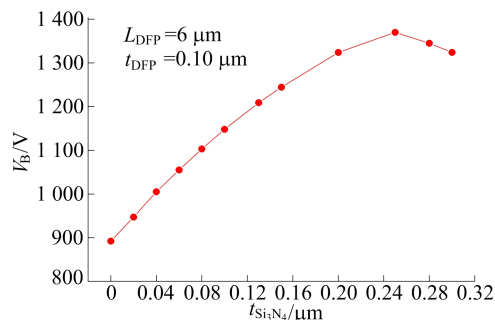
(a) 漏场板结构器件的结构示意图



(b) 不同 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的沟道电场分布曲线



(c) 不同 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的沟道电场强度峰值



(d) 不同 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的击穿电压

图 5 不同 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的仿真结果

为了研究漏场板厚度对击穿电压的影响,结合上述仿真结果,选取 $L_{\text{DFP}} = 6 \mu\text{m}$ 、 $t_{\text{DFP}} = 0.10 \mu\text{m}$,此时器件结构示意图如图 5a 所示。

不同器件的漏场板下方钝化层厚度 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的沟道电场分布曲线如图 5b 所示,可以看出,在 $V_{\text{gs}} = 0 \text{ V}$ 、 $V_{\text{ds}} = 800 \text{ V}$ 时,随着 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 的增大,漏场板边缘下方沟道电场强度峰值随之减小,而漏极下方沟道电场强度峰值增大;提取的电场强度峰值如图 5c 所示,可以看出,在 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.25 \mu\text{m}$ 左右沟道电场强度峰值最小;此时器件的击穿电压最大,如图 5d 所示。

不同 L_{DFP} 器件的击穿电压值见表 3 所列。从表 3 可以看出,当 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.25 \mu\text{m}$ 时,器件的击穿电压提升至 1370 V 峰值。

表 3 不同 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件的击穿电压

$t_{\text{Si}_3\text{N}_4} / \mu\text{m}$	V_{B} / V	$t_{\text{Si}_3\text{N}_4} / \mu\text{m}$	V_{B} / V
0	892	0.13	1209
0.02	947	0.15	1244
0.04	1005	0.20	1324
0.06	1055	0.25	1370
0.08	1103	0.28	1345
0.10	1148	0.30	1324

基于电场调制效应可以看出,由于漏场板在钝化层上方,通过与漏极相连,引入了正电荷,产生电场调制效应,重塑了器件内部的电场。当漏场板下方钝化层越薄,漏场板越接近沟道层,场板产生的电导调制效应越明显。漏场板与漏极相连,当 $V_{\text{ds}} = 800 \text{ V}$,漏场板带正电,电子先是聚集在漏场板边缘下方沟道的位置;随着漏场板下方钝化层厚度逐渐变厚,场板产生的电场调制效应越弱,漏场板边缘下方沟道聚集的电子越少,电子就会朝漏极下方的沟道处聚集起来。因此,器件的沟道电场强度峰值表现出如图 5c 所示的漏场板边缘下方沟道电场强度峰值逐渐减小、漏极下

方沟道电场强度峰值逐渐增大的趋势。

2.5 器件性能比较

本文仿真研究的不同结构参数下 HEMT 器件的击穿电压对比见表 4 所列。相较于文献[12]报道的结果,本文所提出的漏场板和钝化层厚度结构显著提升了增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 的击穿电压。 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 0.25 \mu\text{m}$ 时最优击穿电压高达 1 370 V,比无漏场板结构器件击穿电压提升了 53.6%。

表 4 改变不同参数时器件击穿电压最优值对比

器件结构	最优 V_B/V	增幅/%
无漏场板器件	892	
不同 L_{DFP} 器件	1 248	39.9
不同 t_{DFP} 器件	1 407	57.7
不同 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 器件	1 370	53.6
文献[12]不同 L_{DFP} 器件	473	
文献[12] $t_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 700 \text{ nm}$ 器件	1 123	25.9

3 结 论

本文系统仿真研究了漏场板结构和场板下方钝化层的厚度对 p-GaN 帽层增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT 器件击穿电压的影响,实现了器件击穿电压提升的优化方法。通过引入漏场板,器件的击穿电压由 892 V 增至约 1 248 V;漏场板厚度 t_{DFP} 由 $0.10 \mu\text{m}$ 增至 $1.10 \mu\text{m}$,器件的击穿电压由 892 V 增至 1 407 V;并且在 $t_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 增厚至 $0.25 \mu\text{m}$ 时,达到 1 370 V 峰值,相较于无漏场板结构器件击穿电压提升了 53.6%。击穿电压的提升主要是由于漏场板的电场调制效应降低了电场强度峰值。

[参 考 文 献]

[1] SHEN L, HEIKMAN S, MORAN B, et al. AlGaIn/AlN/GaN high-power microwave HEMT[J]. IEEE Electron Device Letters, 2001, 22(10): 457-459.
 [2] AXELSSON O, GUSTAFSSON S, HJELMGREN H, et al. Application relevant evaluation of trapping effects in AlGaIn/GaN HEMTs with Fe-doped buffer [J]. IEEE

Transactions on Electron Devices, 2015, 62(1): 326-332.
 [3] CHATTERJEE I, UREN M J, KARBOYAN S, et al. Lateral charge transport in the carbon-doped buffer in AlGaIn/GaN-on-Si HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 977-983.
 [4] BAHAT-TREIDEL E, HILT O, BRUNNER F, et al. AlGaIn/GaN/AlGaIn DH-HEMTs breakdown voltage enhancement using multiple grating field plates (MGFPs)[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2010, 57(6): 1208-1216.
 [5] 罗俊,郝跃. 增强型 AlGaIn/GaN/AlGaIn 双异质结槽栅 HEMT 研究[J]. 微电子学, 2019, 49(2): 256-261.
 [6] 乔杰,冯全源. 一种 P-GaN 栅极结合槽栅技术的增强型 HEMT[J]. 微电子学, 2021, 51(3): 404-408.
 [7] 周敏,冯全源,文彦,等. 一种 P-GaN 栅极结合混合帽层结构的 HEMT 器件[J]. 微电子学, 2023, 53(4): 723-729.
 [8] 唐龙谷. 半导体工艺和器件仿真软件 Silvaco TCAD 使用教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2014: 2-3.
 [9] CHIU H C, CHANG Y S, LI B H, et al. High-performance normally off p-GaN gate HEMT with composite AlN/Al_{0.17}Ga_{0.83}N/Al_{0.3}Ga_{0.7}N barrier layers design[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2018, 6: 201-206.
 [10] LIU C H, CHIU H C, WANG H C, et al. Improved gate reliability normally-off p-GaN/AlN/AlGaIn/GaN HEMT with AlGaIn cap-layer[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(10): 1432-1435.
 [11] LUO X, WANG Y, CAO F, et al. A breakdown enhanced AlGaIn/GaN MISFET with source-connected P-buried layer[J]. Superlattices and Microstructures, 2017, 112: 517-527.
 [12] LIAO B, ZHOU Q, QIN J, et al. Simulation of AlGaIn/GaN HEMTs' breakdown voltage enhancement using gate field-plate, source field-plate and drain field plate[J]. Electronics, 2019, 8(4): 406.
 [13] 王立模. 本征击穿电场与禁带宽度的关系[J]. 微电子学, 2006, 36(6): 702-706.
 [14] 刘建华,郭宇锋,黄晓明,等. GaN HEMT 场板研究综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 9-14.
 [15] DUAN B, YANG Y, ZHANG B, et al. Folded-accumulation LDMOST: new power MOS transistor with very low specific on-resistance[J]. IEEE Electron Device Letters, 2009, 30(12): 1329-1331.

(责任编辑 胡亚敏)