文章编号：1007 - 4252(2024) 05 - 0005 - 233　　DOI：10.20027/j.gncq.2024.0038

垂直 GaN-SBD 的场限环-场板复合终端结构设计

张　峻[1,2]，郑　理[1,2,*]，沈玲燕[1,2]，周学通[1,2]，苏　杭[1,2]，程新红[1,2,*]

(1. 集成电路材料全国重点实验室，中国科学院上海微系统与信息技术研究所，上海 200050; 2. 中国科学院大学，北京 101408)

摘要： 垂直 GaN-SBD 需要采用终端结构缓解阳极边缘电场集中现象，进而提高击穿电压。场限环终端结构可有效实现上述功能，但消耗的芯片面积较大，降低了一定面积晶圆上器件的数量。针对这一问题提出了场限环-场板复合终端结构，利用场板分散场限环边缘的电场，从而在保持器件击穿电压的同时减少场限环数量，减小器件的面积。通过 TCAD 仿真系统地研究了场限环-场板复合终端结构对垂直 GaN-SBD 击穿电压及阳极边缘附近的电场分布情况的影响。仿真表明，当维持相同的击穿电压(1700V) ，复合终端结构所需的场限环数量可减少 2 个，终端面积减小 16.47 %，而且阳极边缘的电场强度明显降低。

关键词： 垂直 GaN-SBD; 复合终端结构; 场限环; 场板; 击穿电压

中图分类号： TN313+.4　　**文献标志码：** A

Design of Field Limiting Ring - Field Plate Composite Terminal Structure for Vertical GaN-SBD

ZHANG Jun[1,2]，ZHENG Li[1,2,*]，SHEN Lingyan[1,2]，ZHOU Xuetong[1,2]，SU Hang[1,2]，CHENG Xinhong[1,2,*]

(1. State Key Laboratory of Materials forIntegrated Circuits，Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology，Chinese Academy of Sciences，Shanghai，200050，China;

2. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing，101408，China Department，Nanjing，211100，China)

Abstract: Vertical GaN SBDs requires the use of terminal structures to alleviate the phenomenon of anode edge electric field concentration，thereby increasing the breakdown voltage. The field limiting rings terminal structure can effectively achieve the above functions，but it consumes a large chip area，reducing the number of devices on a certain area of wafer. A field limiting rings - field plate composite terminal struc-

收稿日期： 2024-08-27;　　**修订日期：** 2024-09-10

基金项目： 国家重点研发计划(2022YFB3604300，2022YFB3604301，2022YFB3604303) ; 国家自然科学基金(11705263) ; 上海市科委项目(23511102602) ; 中国科学院青年创新促进会; 集成电路材料全国重点实验室自主课题(SKLJC-Z2024-C02) .

作者简介： 张　峻(1998-) ，男，硕士，主要研究方向为氮化镓功率器件(E-mail: zhangj@ mail.sim.ac.cn) .

通信作者： 郑　理(1991-) ，男，博士，研究员，主要研究方向为宽禁带半导体材料及功率器件(E-mail: zhengli@ mail.sim.ac.cn) .程新红(1970-) ，女，博士，研究员，主要研究方向为功率器件及驱动电路设计(E-mail: xh_cheng@ mail.sim.ac.cn) .

ture has been proposed to address this issue, which utilizes the field plate to disperse the electric field at the edges of the field limiting rings, thereby reducing the number of field limiting rings and decreasing the device area while maintaining the breakdown voltage of the device. The influence of the field limit rings - field plate composite terminal structure on the breakdown voltage and the electric field distribution near the anode edge of vertical GaN SBD was systematically studied using TCAD simulation software. Simulation shows that when maintaining the same breakdown voltage (1700V), the number of field limiting rings required for the composite terminal structure can be reduced by 2, the terminal area can be reduced by 16.47 %, and the electric field strength at the anode edge can be significantly reduced.

Key words: Vertical GaN-SBD; Composite terminal structure; Field limiting ring; Field plate; Breakdown voltage

0 引言

作为第三代半导体材料中的代表，氮化镓(GaN)具有禁带宽度大、临界场强大、耐高温、电子迁移率高等优势，其在功率器件上应用的性能指数(约翰逊优值、巴利伽优值)也相对较大[1-3]。而肖特基二极管(Schottky Barrier Diode，SBD)作为一种多子导电的两端子开关器件，其具有的开关速度快、开关功率损耗小的优点与 GaN 材料的优势相辅相成。与目前常见的横向结构器件相比，垂直结构具有以下优点：第一，通过在垂直方向上增加外延层厚度提高击穿电压，不增加器件面积；第二，电场分布和电流路径从表面移动到器件内部，可靠性更高；第三，垂直结构采用同质外延生长，器件内部缺陷少，散热性能更好[2-5]。因此，垂直 GaN-SBD 在理论上具有优异的性能，近年来在高温、高频、大功率领域的应用中受到广泛关注。

在实际应用中，由于肖特基结面边缘为柱面结或球面结，其曲率效应导致垂直 GaN-SBD 的阳极边缘存在电场集中现象[4,6]。这一现象会使垂直 GaN-SBD 在承受反向电压时，阳极边缘的电场强度远大于器件其他区域，导致器件在阳极边缘提前发生击穿，无法达到理论击穿电压。这一问题严重限制了包括 GaN-SBD 在内的 GaN 基功率器件在高压功率电子领域的应用。

为了提高垂直 GaN-SBD 的击穿电压，需要设计特殊的终端结构，扩展阳极边缘耗尽区，降低曲率效应，从而抑制器件阳极边缘的电场集中现象[6]。常见的终端结构有：结终端拓展[7](Junction termination extension，JTE)、场板[8](Field plate，FP)、场限环[9](Field limit ring，FLR)等。在这些终端结构中，场限环结构对垂直 GaN-SBD 击穿电压的提升效果优于其他两种，该结构采用复数个场限环扩展阳极边缘的耗尽区，但其面积也是几种终端结构中最大的，这将会降低晶圆的利用率。针对这一问题，本文设计了一种场限环-场板复合终端结构，使用较少数量的场限环就可以使器件具有较高的击穿电压。借助 Sentaurus TCAD 仿真软件系统地研究了场限环-场板复合终端结构对垂直 GaN-SBD 击穿电压及反向电压下器件阳极边缘附近的电场分布情况的影响，并与采用普通的场限环终端结构的垂直 GaN-SBD 进行比较。此外，还改变复合终端结构中场板的长度(L_{FP})，研究器件击穿电压的变化趋势，得到优化的设计参数。

1 复合终端结构设计

与无终端结构垂直 GaN-SBD 相比，场限环终端结构提高器件击穿电压的原理为：利用 p 型场限环使阳极边缘耗尽区沿着水平方向扩展，根据曲率效应，反向电压下阳极边缘电场会随着耗尽区的扩展而分散，使器件免于提前击穿。但是在场限环终端结构中，各个 p 型区的边缘也存在电场集中现象，在反向电压下这些 p 型区边缘处电场强度较高，会使器件在 p 型区边缘发生提前击穿。针对这一问题，在本文设计的复合终端结构中，阳极边缘和各个场限环边缘处均有场板从对应的 p 型区上方延伸至 n 型区上方，这些场板与各自连接的 p 型区电位相同，分散在 p 型区边缘集中的电场，防止器件在 p 型区边缘发生提前击穿。因此，场限环-场板复合终端结构提高器件击穿电压的效果高于普通场限环终

端结构，在击穿电压相同时，复合终端结构的面积小于普通场限环终端结构。

在本文提出的复合终端结构中，p 型场限环的参数是设计重点。场限环 p 型掺杂浓度过低会使其在反向电压下被提前耗尽，导致器件在场限环处发生提前击穿，因此场限环 p 型掺杂浓度必须远高于外延层 n 型掺杂浓度。目前 GaN 材料相关工艺中，p 型掺杂的实现主要有 Mg 离子注入和选择性二次外延两种方式。其中 Mg 离子注入工艺需要后续高温退火以激活注入的 Mg 离子，而高温退火会使 GaN 外延层表面发生分解，严重影响器件性能。此外，Mg 离子激活率很低，因此通过离子注入很难实现较高浓度的 p 型掺杂。

本复合终端结构中 p 型区的掺杂可以采用选择性二次外延实现，简要工艺流程为：先在 n 型 GaN 外延层表面刻蚀出各 p 型区对应的凹槽，再选择性地在凹槽中二次外延 p 型 GaN 填满凹槽，之后在表面沉积钝化层（SiO_2、Si_3N_4等材料）并刻蚀出阳极及各个场板对应的凹槽，最后用电子束蒸发金属填满凹槽，形成阳极和场板。除此以外，氧化镍（NiO）作为一种天然 p 型掺杂的半导体材料在 GaN 基器件中的应用也得到了广泛关注。由于 NiO 禁带宽度大，且天然具有较高浓度 p 型掺杂，因此适合在 GaN 基功率器件中作为异质结的 p 型区材料。采用 NiO 作为场限环的工艺流程与二次外延基本相同，只是将二次外延 GaN 材料改为磁控溅射生长 NiO 材料。本文所设计的具有场限环-场板复合终端结构的垂直 GaN-SBD 工艺流程图如图 1 所示。

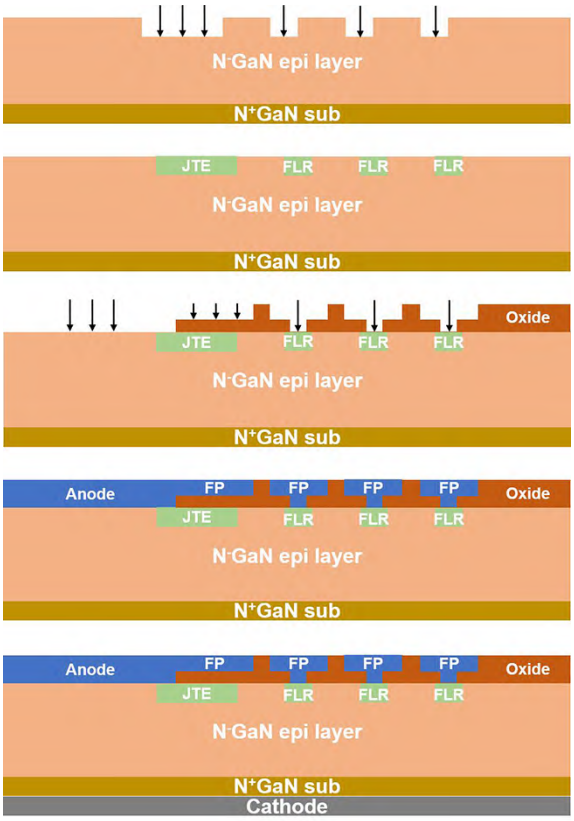


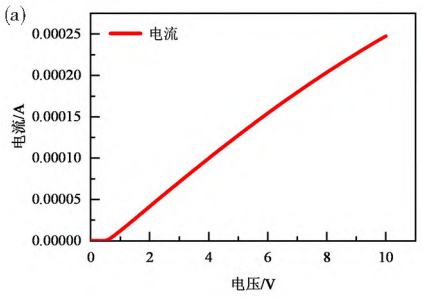
图 1　具有场限环-场板复合终端结构的垂直 GaN-SBD 工艺流程图

Fig. 1　Process flowchart of vertical GaN SBD with field limiting ring field plate composite terminal structure

2　仿真结果与分析

本文设计的垂直 GaN-SBD 性能指标为：击穿电压大于 1700 V，比导通电阻小于 2 mΩ·cm^2。由于垂直结构器件的正向导通特性不受终端结构影响，因此先对垂直 GaN-SBD 元胞进行仿真，之后在元胞基础上对边缘终端结构进行击穿特性仿真，得到击穿电压满足要求的器件参数。考虑阳极边缘的电场集中效应后，器件的击穿电压远小于元胞仿真的击穿电压，因此应使元胞在比导通电阻符合要求的同时具有远高于器件设计目标的击穿电压。

通过前期仿真研究，已确定的基本参数为：外延层厚度 15 μm、掺杂浓度 5×10^{15} cm^{-3}；p 型场限环宽度及间距均为 2 μm，掺杂浓度 1×10^{18} cm^{-3}；器件边缘 n+型场终止环宽度 10 μm；阳极为肖特基金属；出于工艺兼容的考虑，复合终端结构中的场板材料与阳极金属材料相同；器件表面钝化层以及场板与 GaN 表面之间的介质均为二氧化硅。垂直 GaN-SBD 元胞的导通特性与击穿特性如图 2 所示。元胞的比导通电阻为 1.85 mΩ·cm^2，击穿电压为 2833 V。



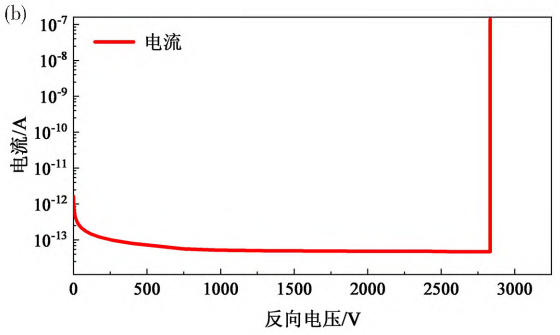


图 2 垂直 GaN-SBD 元胞的(a) 导通特性与(b) 击穿特性曲线

Fig. 2(a) conduction characteristics and (b) breakdown characteristics curves of vertical GaN-SBD cells

首先对无终端结构垂直 GaN-SBD 器件进行仿真,以验证器件阳极边缘存在电场集中现象。由图 3 的临近击穿时(击穿电压 355 V) 无终端结构垂直 GaN-SBD 器件内部电场分布图可见,反向电压下阳极边缘电场强度远大于器件内部,证明阳极边缘存在电场集中现象。

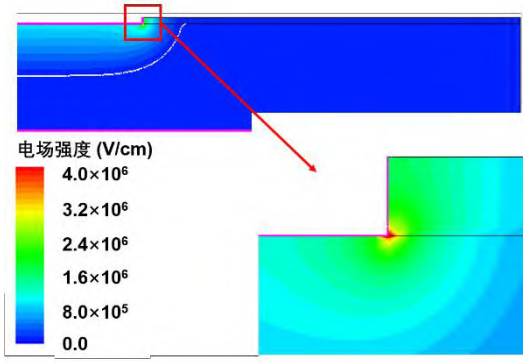


图 3 无终端结构垂直 GaN-SBD 在反向电压下的器件内部电场分布图

Fig. 3 Electric field distribution diagram of vertical GaN SBD with no terminal structure under reverse voltage

以垂直 GaN-SBD 元胞为基础,对具有复合终端结构的垂直 GaN-SBD 进行击穿特性仿真。设场板在水平方向超出 P 型区的长度定义为场板长度(L_{FP}) ,仿真中场限环的宽度和间距不变,改变场板长度(L_{FP}) ,得到器件的击穿特性曲线(如图 4 所示) ,进行对比,优选出击穿电压最大的 L_{FP} 值。由于 P 型区间距为 2 μm,因此两片场板的长度之和应小于 2 μm,且场板长度过小无法起到分散电场的作用,故对比场板长度为 0.4 μm、0.6 μm、0.8 μm 时的击穿电压。由图 4 可见,改变 L_{FP} 对器件的击穿电压有一定的影响,当 L_{FP} = 0.8 μm 时,器件的击穿电压最大,为 1971 V。

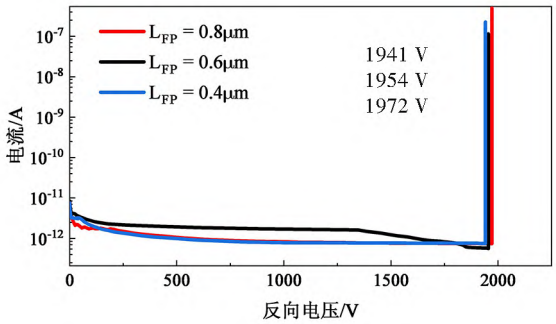


图 4 不同 L_{FP} 的复合终端结构垂直 GaN-SBD 的击穿特性对比图

Fig. 4 Comparison of breakdown characteristics of vertical GaN SBD composite terminal structures with different L_{FP}s

对具有复合终端结构垂直 GaN-SBD 和普通场限环终端结构垂直 GaN-SBD 进行击穿特性仿真,并对比分析两种结构器件的击穿电压和相同反向电压下电场分布情况。图 5 为击穿特性曲线,图 6 和图 7 分别为反向电压 1700 V 下肖特基结接触面处水平方向的电场分布曲线和器件内部电场分布图。

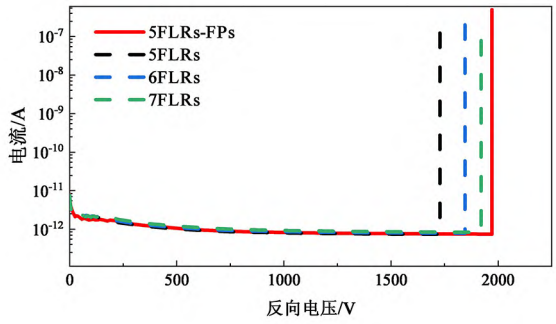


图 5 复合终端结构与普通场限环终端结构击穿特性比较

Fig. 5 Comparison of breakdown characteristics between composite terminal structure and ordinary field limiting rings terminal structure

从图 5 的击穿特性曲线可见,具有场限环-场板复合终端结构的垂直 GaN-SBD 在 5 个场限环的条件下具有 1971 V 的击穿电压,而具有 5 个普通场限环的垂直 GaN-SBD 击穿电压仅为 1728 V,具有 7 个场限环的器件击穿电压(1920 V) 也低于复合终端结构 5 个场限环的击穿电压。这验证了本文提出

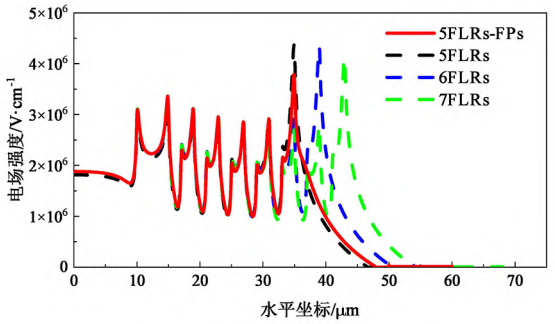


图 6　复合终端结构与普通场限环终端结构在 1700V 反向电压下沿肖特基结接触面水平方向的电场分布特性

Fig. 6 Electric field distribution characteristics in the horizontal direction along the Schottky junction contact surface under reverse voltage of 1700V

的复合终端结构对于垂直 GaN-SBD 击穿电压具有显著提高效果：在场限环数量相同时，场限环-场板终端结构可以让器件具有更高的击穿电压；在击穿电压指标相同的条件下，场限环-场板复合终端结构所需场限环数量少于普通场限环终端结构，这意味着在实际应用中可以减小器件面积。

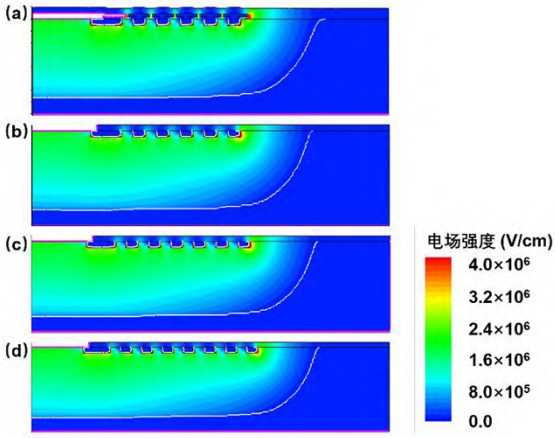


图 7　不同场终端结构下器件内部电场分布（反向电压 1700 V）a）5FLRs-FPS，b）5FLRs，c）6FLRs，d）7FLRs

Fig. 7 Internal electric field distribution of devices with different terminal structures (Reverse voltage = 1700V). a) 5FLRs-FPS, b) 5FLRs, c) 6FLRs, d) 7FLRs

从图 6 的反向电压下肖特基结面处水平方向电场分布曲线和图 7 的反向电压下器件内部电场分布图可见，在承受反向电压时，采用普通场限环终端结构的垂直 GaN-SBD 内部电场集中于各个场限环边缘，其中末尾场限环边缘电场强度格外高。而采用场限环-场板复合终端结构后，场限环边缘电场强度有一定程度减小，这说明由于与各场限环等电位的场板的作用，场限环边缘的电场集中现象有所缓解。末尾场限环边缘电场强度大幅减小，这是由于末尾场限环上的场板向右侧延伸更多，使得场板对耗尽区的扩展更多，电场更分散。

此外，还将具有本文设计的复合终端结构垂直 GaN-SBD 与具有不同数量场限环的普通场限环终端结构垂直 GaN-SBD 的击穿电压及终端结构面积进行了对比，如图 8 所示。

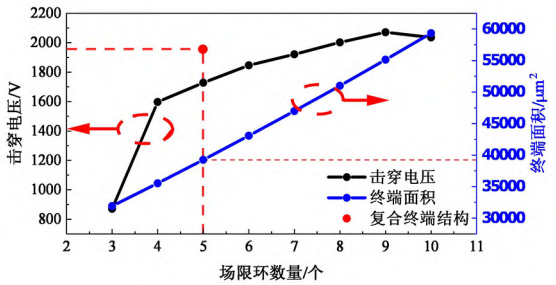


图 8　复合终端结构与普通场限环终端结构的击穿电压与终端结构面积对比

Fig. 8 Comparison of breakdown voltage and terminal structure area between composite terminal structure and ordinary field limiting ring terminal structure

设器件俯视图为圆形，阳极半径为 100 μm，则器件终端面积为器件总面积减去阳极面积，如公式 1 所示，式中 S_{term} 为终端面积，R 为阳极半径，L 为终端结构总长度。

$$S_{term}=\pi\left[(R+L)^2-R^2\right] \tag{1}$$

由图 8 可见：采用普通场限环终端结构的器件，其击穿电压与终端面积随场限环数量增加而增大，但击穿电压逐渐趋于饱和；而本文提出的场限环-场板复合终端结构在具有较大击穿电压的同时，终端面积明显更小。本文提出的复合终端结构具有 5 个场限环，终端面积为 39250 μm²，而相同击穿电压的普通场限环终端结构具有 7 个场限环，终端面积为 46986.96 μm²，复合终端结构面积相比普通场限环终端面积减少了 16.47%。

3　结论

垂直 GaN-SBD 具备开关速度快、耐压大、散热性能好等多种优点，在功率电子领域应用前景广阔。

但由于需要采用同质外延，所需衬底的成本高昂，应尽可能缩小器件面积以提高衬底的利用率。所以，在不影响器件性能的前提下减小垂直 GaN-SBD 终端结构的面积就显得尤为重要。

本文设计并仿真验证了场限环-场板复合终端结构对垂直 GaN-SBD 反向耐压特性的提升效果。借助 Sentaurus TCAD 软件仿真了场板长度的变化对器件击穿电压的影响趋势，最终得到优化设计参数：当 L_{FP} 为 0.8 μm 时，垂直 GaN-SBD 的击穿电压可以达到 1971 V。对比采用复合终端结构的垂直 GaN-SBD 与采用普通场限环终端结构的垂直 GaN-SBD 的击穿特性及相同反向电压下的电场分布，证明本文设计的复合终端结构可以实现使用更少场限环使垂直 GaN-SBD 达到更高击穿电压的效果。要达到相同的击穿电压，复合终端结构面积相比普通场限环终端结构面积减小了 16.47 %。本文的结论对于 GaN 基功率器件及相关工艺的研究具有重要参考意义，对 GaN 材料在高压应用领域的应用也具有一定意义。

参考文献：

[1] UMESH K. MISHRA. Gallium Nitride and Silicon Carbide Fight for Green Tech Domination [EB/OL]. [2023-03-26 * 2024-7-12]. https://spectrum.ieee.org/silicon-carbide.

[2] Zhang Y. GaN-based vertical power devices [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2017.

[3] Zhang Y, Dadgar A, Palacios T. Gallium nitride vertical power devices on foreign substrates: a review and outlook [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(27): 273001.

[4] Laroche J R, Ren F, Baik K W, et al. Design of edge termination for GaN power Schottky diodes [J]. Journal of Electronic materials, 2005, 34: 370-374.

[5] Kizilyalli I C, Edwards A P, Aktas O, et al. Vertical Power p-n Diodes Based on Bulk GaN [J]. 2014 IEEE Transactions on Electron Devices, 62(2), 414-422

[6] Sun Y, Kang X, Zheng Y, et al. Review of the recent progress on GaN-based vertical power Schottky barrier diodes (SBDs) [J]. Electronics, 2019, 8(5): 575.

[7] Liu X, Lin F, Li J, et al. 1.7-kV Vertical GaN-on-GaN Schottky Barrier Diodes With Helium-Implanted Edge Termination [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(4): 1938-1944.

[8] Tanaka N, Hasegawa K, Yasunishi K, et al. 50 A vertical GaN Schottky barrier diode on a free-standing GaN substrate with blocking voltage of 790V [J]. Applied Physics Express, 2015, 8(7): 071001.

[9] Yin R, Li Y, Wen C P, et al. High voltage vertical GaN-on-GaN Schottky barrier diode with high energy fluorine ion implantation based on space charge induced field modulation (SCIFM) effect [C]. Proceedings of the 2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2020.