一种基于HKS新结构的高优值氧化镓二极管

蒋典兵[1]，程骏骥[1]，刘一锴[2]，周　浩[2]，杨洪强[1]
（1. 电子科技大学，成都 611731；2. 中国电子科技集团公司第二十四研究所，重庆 400060）

摘　要： 聚焦氧化镓功率器件领域，提出一种在阳极端同时具有高介（High-*k*，HK）区和肖特基（Schottky，S）接触的HKS二极管。相比目前主流的结势垒肖特基（Junction Barrier Schottky，JBS）二极管，新结构利用耐压时HK区可在表面形成高剂量束缚电荷的物理机制，对漂移区发出的电力线进行更有效地牵引，从而进一步优化电场分布，获得显著的反向性能提升。基于校准模型的仿真结果表明，在不同参数的各个对照组中，HKS均较JBS表现出更优的性能，尤其当区间距为1.5 μm时，击穿电压相对提升20.2%，而比导通电阻仅增加9.4%，令功率优值提升了32.2%。进一步研究表明，在$1\times10^{12}cm^{-2}$的界面电荷的影响下，HKS二极管的性能未出现明显退化，体现出充分的工艺鲁棒性。

关键词： 氧化镓；HK材料；JBS二极管
中图分类号：TN405　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1004-3365(2025)06-1063-06
DOI：10.13911/j.cnki.1004-3365.250264

A Novel Ga_2O_3 Diode with HKS Structure for High Figure-of-Merit

JIANG Dianbing[1], CHENG Junji[1], LIU Yikai[2], ZHOU Hao[2], YANG Hongqiang[1]
(1. *University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *P. R. China*;
2. *The 24th Research Institute of China Electronics Technology Group Corp., Chongqing* 400060, *P. R. China*)

Abstract: A novel High-*k* Schottky (HKS) diode integrating a High-*k* (HK) region and Schottky contact at the anode terminal is proposed for β-Ga_2O_3 power devices. Compared with conventional Junction Barrier Schottky (JBS) diodes, the new structure is designed to utilize high-dose bound charges formed at the HK region surface under reverse bias to effectively guide electric field lines emanating from the drift region, thereby optimizing electric field distribution and significantly improving reverse characteristics. Calibration-based simulations demonstrate that the HKS diode outperforms JBS counterparts across various parameter sets. At a region spacing of 1.5 μm, the breakdown voltage is increased by 20.2% relatively, while the specific on-resistance rises only by 9.4%, achieving a 32.2% enhancement in power figure of merit. Further investigations reveal that stable performance is maintained by the HKS diode under $1\times10^{12}cm^{-2}$ interface charges, confirming its process robustness.

Key words: β-Ga_2O_3; High-*k*; JBS diode

0　引　言

对功率器件而言，更高功率优值（Power Figure of Merit，PFOM）往往对应着更低能耗，一直是其技术升级迭代的重要目标[1]。β相氧化镓（β-Ga_2O_3）凭借其超宽禁带属性，已成为制作下一代高优值器件的核心候选材料之一[2]。然而，由于该材料的p型掺杂困难，其实际应用仍受到极大限制[3]。

在二极管方向，目前主要的解决方案是引入p

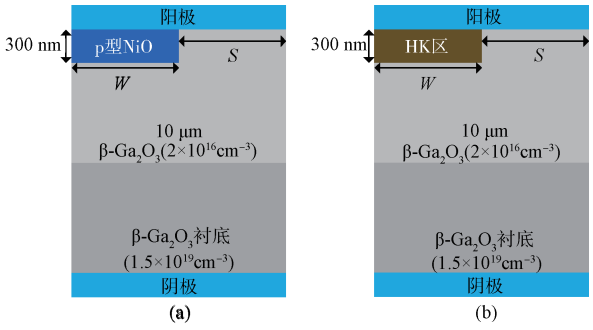
收稿日期：2025-07-26；**定稿日期：**2025-09-18
基金项目：中国电子科技集团公司第二十四研究所稳定支持专项（YG2402）
作者简介：蒋典兵（2000—），男（土家族），湖北恩施人，硕士研究生，从事功率半导体器件技术研究。
程骏骥（1985—），男（汉族），江西景德镇人，副教授，从事功率半导体器件技术研究。通信作者。
刘一锴（1988—），男（汉族），四川广安人，高级工程师，从事宇航厚膜电源技术研究。通信作者。

型氧化镍（NiO）[4]。由此制作出的在阳极端同时具有p-NiO/β-Ga_2O_3异质结和肖特基接触的结势垒肖特基（JBS）二极管，已经实现了1.94 mΩ·cm^2的比导通电阻（$R_{on,sp}$）和1.34 kV的击穿电压（BV）[5]。然而，因为异质结调制电场的能力始终有限，提升该器件优值的研究依然面临着瓶颈。

近年来，高介（HK）材料在功率器件中的应用日趋增多[6]。已有研究表明，运用相对介电常数（ε_r）超过80的材料即可显著优化器件中的电场分布[7]。基于上述背景，本文提出一种用HK区替代p-NiO形成的新型HKS二极管，并通过理论分析和仿真研究，揭示HK区提升器件优值的机理和效果，为氧化镓二极管的技术升级提供了新的思路。

1　结构原理

如图1（a）所示，传统JBS二极管建立在高浓度的n型β-Ga_2O_3衬底上。衬底下方与阴极金属形成欧姆接触，上方则外延有低浓度的n型β-Ga_2O_3作为器件的漂移区。在漂移区顶部，左侧被刻蚀并填充p-NiO，右侧和阳极金属形成肖特基接触。图1（b）示出的新型HKS二极管与JBS相比，除了用HK区替代p型NiO，其余结构一致，因此它们的工艺方案和工艺可行性也是接近的。



（a）JBS二极管　　（b）HKS二极管

图1　半元胞结构示意图

在正向偏置下，两种器件的电流输运均由阳极的肖特基接触主导。当给阳极施加正电压时，肖特基接触的势垒高度降低，漂移区中的电子通过热电子发射进入金属，形成正向电流。因此，在相同的区间距（S）下，两种器件的正向性能是相近的。

在反向偏置下，2种器件的耐压机理既相似也不同。在JBS二极管中，耗尽的p-NiO留下带负电的电离受主杂质，吸引了相当一部分漂移区中发出的电力线，从而抑制肖特基接触边缘的峰值电场，避免器件过早击穿。而在HKS二极管中，虽然作为绝缘介质的HK区不会耗尽，但根据介质极化理论，其下表面也会形成带负电的束缚电荷[8]。毫无疑问，无论是电离受主杂质还是束缚电荷，其负电荷总剂量越大，对电场的调制优化效果就越强。p-NiO产生的电离受主杂质总量由其掺杂浓度和几何结构决定，HK区产生的束缚电荷总量由其ε_r决定。后续仿真可以表明，在相同的结构条件下，ε_r= 80的HK区所产生的负电荷总剂量就可以超过掺杂浓度为1×10^{18} cm^{-3}的p-NiO所产生的，令HKS二极管获得比JBS二极管更加优异的反向性能。

因此，本文提出的HKS二极管相比于传统JBS二极管，可以在保持相近正向导通性能的条件下大幅提高反向耐压性能，获得功率优值的显著提升。

2　仿真验证

为验证提出结构的优势，利用Sentaurus软件进行了仿真研究。器件各重要区域的掺杂浓度和尺寸如图1所标记，其中p-NiO的厚度为0.3 μm，宽度（W）为1.5 μm，掺杂浓度为1×10^{18} cm^{-3}，HK区的厚度为0.3 μm，宽度为1.5 μm，ε_r初始值为80。接下来将首先根据参考文献校准仿真模型，然后比较不同S下的器件性能。

2.1　模型校准

仿真中的材料参数根据文献[2, 5, 9, 10]设置，具体如表1所示。

表1　仿真中使用的材料参数

参数名称/单位	β-Ga_2O_3	p-NiO
禁带宽度/eV	4.85	4
电子亲和能/eV	4.0	1.8
相对介电常数	10	11.8
电子有效质量/m_0	0.28	—
空穴有效质量/m_0	—	6
室温电子迁移率/(cm^2•V^{-1}•s^{-1})	200	—
室温空穴迁移率/(cm^2•V^{-1}•s^{-1})	—	0.24

仿真中的物理模型使用了SRH复合、热电子发射、恒定载流子产生、带隙缩小和菲利普统一模型等[11]。为仿真肖特基接触激活了势垒隧穿、势垒降低和界面复合模型，为仿真器件击穿现象激活了基于Chynoweth定律的Van Overstraeten电离模型[11]。

基于上述参数和模型仿真了p-NiO/β-Ga_2O_3异质结二极管，与文献[10]中的实验结果进行了对比。

如图2和表2所示，V_F表示二极管的正向电压，I_F表示正向电流，V_R表示反向电压，I_R表示反向电流。在开启电压V_{on}、$R_{on,sp}$和BV等方面，仿真结果与实验记录高度吻合，说明了所采用仿真参数和模型的合理性。当然，仿真中漏电比实验小很多，是因为没有对背景载流子和材料缺陷等随实验条件呈敏感变化的复杂因素加以考虑。

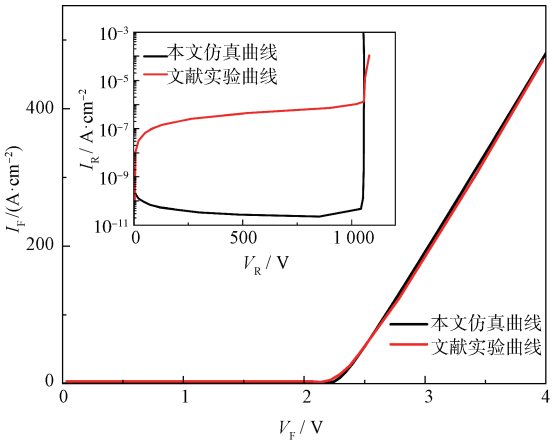


图2　本文仿真与文献实验[10]的异质结正反向特性对比

表2　仿真结果和文献实验结果的关键指标对比

参数	文献实验结果[10]	仿真结果
V_{on}(@I_F=1 A/cm^2)/V	2.4	2.42
$R_{on,sp}$(differential)/mΩ·cm^2	3.5	3.49
BV(@I_R=1 A/cm^2)/V	1 059	1 048

2.2　正向特性

基于校准后的仿真模型，分别对两种器件展开性能仿真。图3展示对比了它们的正向I-V特性曲线，表3提取对比了它们的正向特性参数。

上述对比体现2个规律：

1）随着S增加，V_{on}几乎不变，而$R_{on,sp}$降低。这是由于二极管正偏时，肖特基接触先导通，故V_{on}几乎不受p-NiO或HK区以及S的影响。但随着S增加，肖特基接触的面积相对p-NiO或HK区变大，导致二极管的正向电流密度上升，$R_{on,sp}$下降。

2）HKS二极管的$R_{on,sp}$相较JBS的处于微弱劣势。这是因为HK区完全不参与正向导电，而p-NiO/β-Ga_2O_3异质结可以参与导电。但由于β-Ga_2O_3中空穴迁移率极低，所以空穴电流极小，电导调制效应非常有限。而且随着S增加，HK区的宽度占器件元胞宽度的比例减小，HKS二极管与JBS二极管的$R_{on,sp}$差距也越来越小。

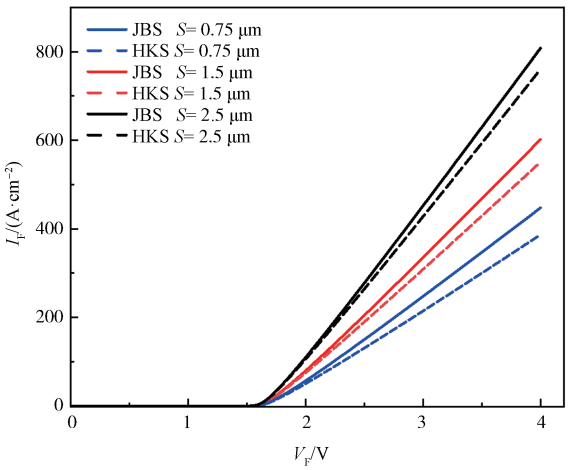


图3　正向I-V特性曲线对比

表3　正向特性参数对比

S/μm	V_{on}/V (HKS/JBS)	$R_{on,sp}$/mΩ·cm^2 (HKS/JBS)	$R_{on,sp}$增率/% (HKS 较 JBS)
0.75	1.59/1.59	6.21/5.39	15.2
1.50	1.57/1.57	4.41/4.03	9.40
2.50	1.55/1.55	3.17/2.98	6.40

2.3　反向特性

图4展示对比了两种器件的反向I-V特性曲线。表4提取并对比了它们的BV值。

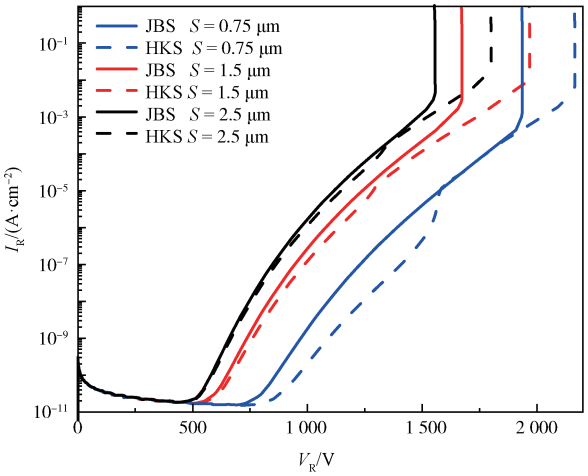


图4　反向I-V特性曲线对比

表4　反向特性参数提取

S/μm	BV/V (HKS/JBS)	BV增率/% (HKS 较 JBS)
0.75	2 165/1 936	11.8
1.50	1 968/1 637	20.2
2.50	1 800/1 556	15.6

可见2个规律：

1）随着增加，它们的反向漏电均增加，BV均下降。这是因为当S增加时，电子的势垒隧穿路径变

宽，从而使反向漏电增加，如图5所示。

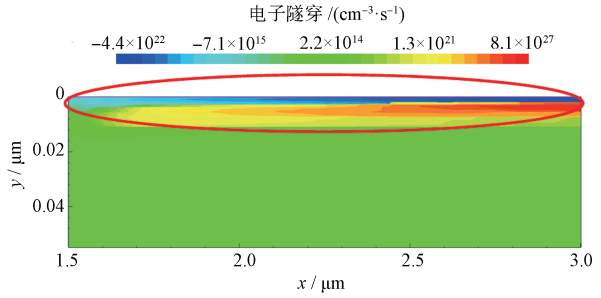


图5　反向偏置时肖特基接触附近的电子隧穿

2）在相同S条件下，HKS二极管的BV显著高于JBS的。这是因为，当给阴极施加正高压时，阳极金属对漂移区展开耗尽，耗尽的漂移区中留下带正电的电离施主杂质，它们发出电力线被阳极金属吸收，造成肖特基接触的金半界面上出现强电场。在JBS二极管中，p-NiO会发生耗尽，提供带负电的电离受主杂质，吸引部分漂移区中发出的电力线，缓解肖特基接触界面处的电场强度（E），如图6所示。而在HKS二极管中，HK区边缘会出现带负电的束缚电荷，也能起到类似作用。进一步，从图6可见，当HK区的ε_r为80时，它起到的优化电场分布的作用已超过了浓度为1×10^{18} cm^{-3}的p-NiO，说明它产生的负电荷总剂量已超过后者，印证了前述理论分析出的提出器件优势。后续仿真还将表明，通过提高ε_r可继续优化HKS二极管的反向性能。

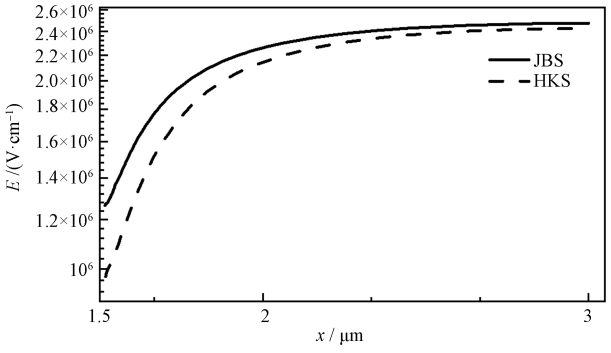


图6　1 kV时肖特基接触下方0.01 μm处的电场分布

2.4　功率优值

结合表3和表4，计算出两种器件的PFOM，如表5所示。可见，HKS二极管的性能普遍优于JBS的，当S为1.5 μm时，PFOM相对提升率高达32.2%。

图7将本工作与相关文献进行了对比。可以看出，本文提出的结构进一步改善了BV与$R_{on,sp}$的折中关系，将氧化镓二极管的优值推进到了新的水平。

表5　PFOM提取

S/μm	PFOM/(GW·cm^{-2}) (HKS/JBS)	PFOM增率/% (HKS较JBS)
0.75	0.755/0.695	8.60
1.50	0.878/0.664	32.2
2.50	1.022/0.812	25.8

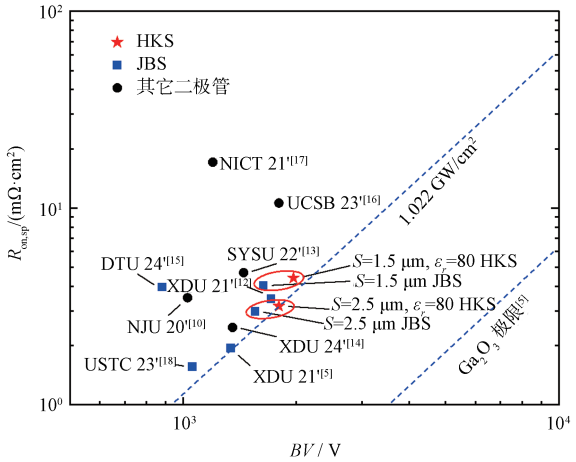


图7　本工作与相关文献的对比

3　讨　论

上述仿真仅仅将HK材料的ε_r设置为80，实际上有$SrTiO_3$[19]、PZT[20]等更高介的材料被报道用于功率器件。因此，进一步研究了ε_r对HKS二极管性能的影响，并讨论了实际加工时可能存在的位于HK区和β-Ga_2O_3交界面的界面电荷的影响。

3.1　ε_r的影响

$R_{on,sp}$会随着ε_r增大而轻微增大，因为正压下HK区边缘的带正电束缚电荷会轻微提升附近β-Ga_2O_3电势，使阳极电子的注入轻微减弱。但由于HKS二极管的正向导通仍主要取决于肖特基接触，所以正向特性变化幅度较小，如图8所示。

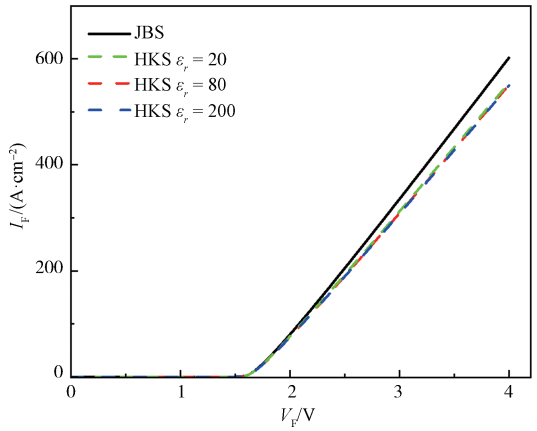


图8　不同ε_r的HKS二极管（$S=1.5$）的正向特性曲线

但对反向特性而言，ε_r越大，极化产生的束缚电荷就越多，使得HK区调制电场的效果越强，导致器件的BV越大，如图9所示。

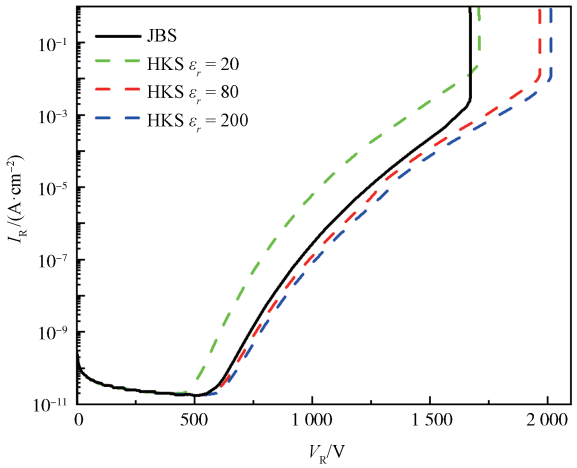


图9　不同ε_r的HKS二极管（S=1.5）的反向I-V特性曲线

图10展示了器件综合性能随ε_r的变化趋势。可以看出，PFOM随着ε_r增加而增加，增速逐渐放缓。

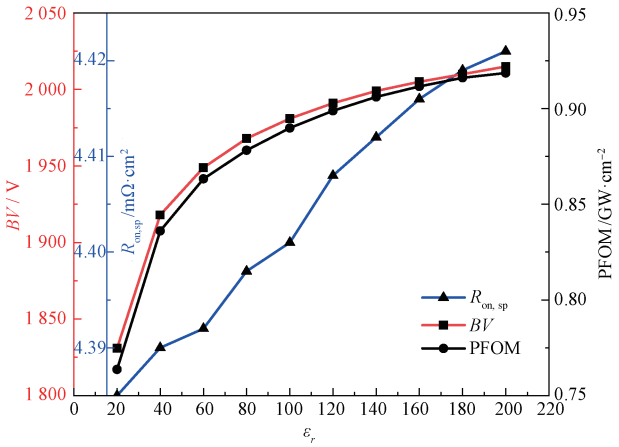


图10　不同ε_r的HKS二极管（S=1.5）的性能曲线

3.2　界面电荷的影响

在实际加工时，HK区与β-Ga_2O_3的界面可能由于晶格失配、生长工艺等原因出现界面态。为观察界面态的影响，在界面处设置浓度为1×10^{12} cm^{-2}的界面电荷（Q_{it}）。正的Q_{it}会略微降低肖特基势垒高度，进而提升电流导通能力，使$R_{on,sp}$略微减小，而负的Q_{it}则作用相反，如图11所示。同时，从图12可见，Q_{it}对器件反向特性的影响较小，说明高剂量的束缚电荷克制了界面电荷的影响，因此HKS二极管具有充分的工艺鲁棒性。

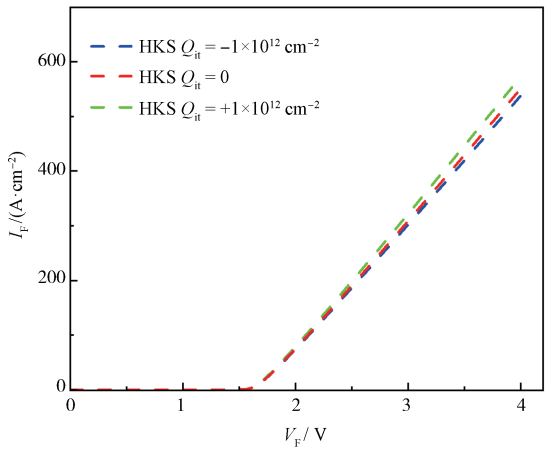


图11　不同界面电荷浓度的器件正向特性曲线

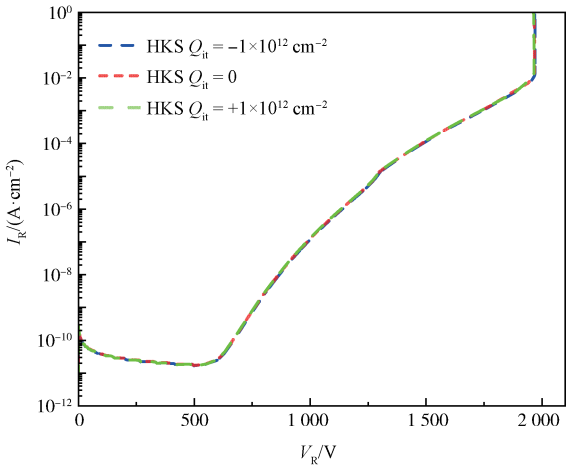


图12　不同界面电荷浓度的器件反向特性曲线

4　结　论

本文提出了一种新型的HKS氧化镓二极管。与传统的JBS二极管相比，它利用HK区极化产生的高剂量束缚电荷更有效地优化了器件的电场分布。仿真结果表明，ε_r=80时，在相同的1.5 μm区间距下HKS二极管的PFOM较JBS的提升了32.2%，在2.5 μm区间距下甚至达到了1.022 GW/cm^{2}的新高水平。研究还表明，器件优值随着ε_r的增加还有进一步提升空间，对界面电荷工艺误差也表现出充分的鲁棒性。

参 考 文 献：

[1] BALIGA B J. Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 1989, 10(10): 455-457.

[2] PEARTON S J, YANG J C, CARY P H IV, et al. A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices[J].

Applied Physics Reviews, 2018, 5: 011301.

[3] LYONS J L. A survey of acceptor dopants for β[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(5): 05LT02.

[4] JI X Q, WANG J J, QI S, et al. Improvement of Ga_2O_3 vertical Schottky barrier diode by constructing NiO/Ga_2O_3 heterojunction [J]. Journal of Semiconductors, 2024, 45(4): 042503.

[5] YAN Q L, GONG H H, ZHANG J C, et al. β-Ga_2O_3 hetero-junction barrier Schottky diode with reverse leakage current modulation and BV^2/R_{on}, sp value of 0.93 GW/cm^2[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(12): 122102.

[6] ZHANG H P, CHEN C Y, JIA R X, et al. Band alignment of β-Ga_2O_3 with $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, and related composites [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2023, 12(8): 085005.

[7] J J CHENG, T ZHONG, B YI, et al. A novel lateral power MOSFET with ultra-low energy consumption and extraordinary robustness. [C]// 2023 35th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Hong Kong, China. 2023: 282-285.

[8] 殷之文. 电介质物理学(第2版)[M]. 北京:科学出版社, 2003.

[9] CHENG J J, ZHONG T, YI B, et al. A novel lateral power MOSFET with ultra-low energy consumption and extraordinary robustness [C]//2023 35th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Hong Kong, China. 2023: 282-285.

[10] ZHOU H, ZENG S F, ZHANG J C, et al. Comprehensive study and optimization of implementing p-NiO in β-Ga_2O_3 based diodes *via* TCAD simulation [J]. Crystals, 2021, 11(10): 1186.

[11] LU X, ZHOU X D, JIANG H X, et al. 1-kV sputtered p-NiO/n-Ga_2O_3 heterojunction diodes with an ultra-low leakage current below 1~μA/cm2[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(3): 449-452.

[12] Synopsys. Sentaurus Process User Guide [M]. Mountain View: Synopsys, Inc, Version P-2019.03.

[13] LV Y J, WANG Y G, FU X C, et al. Demonstration of β-Ga_2O_3 junction barrier Schottky diodes with a baliga's figure of merit of 0.85 GW/Cm2 or a 5A/700 V handling capabilities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 6179-6182.

[14] LIAO C, LU X, XU T L, et al. Optimization of NiO/β-Ga_2O_3 heterojunction diodes for high-power application [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(10): 5722-5727.

[15] LIU D H, ZHANG Z, CHEN H, et al. Performance enhancement of NiOx/ β-Ga_2O_3 heterojunction diodes by synergistic interface engineering [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(8): 4578-4583.

[16] THAN P H, THAN T Q, TAKAKI Y. Design and evaluation of β-Ga_2O_3 junction barrier Schottky diode with p-GaN heterojunction[J]. Physica Scripta, 2024, 99(9): 095975.

[17] ROY S, KOSTROUN B, COOKE J, et al. Ultra-low reverse leakage in large area kilo-volt class β-Ga_2O_3 trench Schottky barrier diode with high-k dielectric RESURF [J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(24): 243502.

[18] OTSUKA F, MIYAMOTO H, TAKATSUKA A, et al. Large-size (1.7 × 1.7 mm^2 β-Ga_2O_3 field-plated trench MOS-type Schottky barrier diodes with 1.2 kV breakdown voltage and 10^9 high on/off current ratio[J]. Applied Physics Express, 2022, 15(1): 016501.

[19] WU F H, WANG Y G, JIAN G Z, et al. Superior performance β-Ga_2O_3 junction barrier Schottky diodes implementing p-NiO heterojunction and beveled field plate for hybrid Cockcroft - Walton voltage multiplier [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(3): 1199-1205.

[20] LIN J J, CHENG J J, LI P, et al. Study on $SrTiO_3$ film for the application of power devices [J]. Superlattices and Microstructures, 2019, 130: 168-174.

[21] LI J H, LI P, HUO W R, et al. Analysis and fabrication of an LDMOS with high-permittivity dielectric[J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(9): 1266-1268.