

文章编号: 1671-7449(2026)03-0299-09

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(3): 299-307.

P-NiO/ β -Ga₂O₃异质结肖特基二极管电学特性仿真

刘晋花^{1,2}, 余建刚², 李子唯², 李旺旺^{1*}, 李丰超², 李腾腾^{2*}, 雷程², 梁庭²

(1. 太原师范学院 物理系, 山西 晋中 030600;

2. 中北大学 宽禁带半导体超越照明材料与技术全国重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 针对氧化镓P型掺杂难导致同质PN结二极管难以制备, 无法满足大功率工况下对高耐压肖特基二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)的需求, 提出一种基于P-NiO组成的P-NiO/ β -Ga₂O₃异质结型二极管结构, 重点研究了具有P-NiO保护环、场板辅助P-NiO保护环以及场板辅助结势垒结构的3种终端结构的PN结二极管的电学特性。结果表明: 场板结构可以有效缓解电场集中效应, 场板辅助结势垒结构的 β -Ga₂O₃ PN结二极管反向击穿电压显著提升, 与P-NiO保护环结构(2 536.4 V)、场板辅助P-NiO保护环结构(2 338.2 V)相比, 当P-NiO掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 击穿电压达3 312 V, 分别提升30.6%和41.6%; 器件功率品质因数达7.02 GW/cm², 较常规结构(3.51 GW/cm²)提升100%, 较P-NiO保护环结构最高值(4.15 GW/cm²)提升69.1%。本研究为研制高性能 β -Ga₂O₃ SBD器件提供了理论依据。

关键词: 氧化镓; 肖特基二极管; 击穿电压; 电场集中效应; 功率品质因数

中图分类号: TN311.7

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026036

引用格式: 刘晋花, 余建刚, 李子唯, 等. P-NiO/ β -Ga₂O₃异质结肖特基二极管电学特性仿真[J]. 测试技术学报, 2026, 40(3): 299-307.

LIU Jinhua, YU Jiangang, LI Ziwei, et al. Simulation of electrical characteristics of P-NiO/ β -Ga₂O₃ schottky diodes[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(3): 299-307.

Simulation of Electrical Characteristics of P-NiO/ β -Ga₂O₃ Schottky Diodes

LIU Jinhua^{1,2}, YU Jiangang², LI Ziwei², LI Wangwang^{1*}, LI Fengchao², LI Tengting^{2*},
LEI Cheng², LIANG Ting²

(1. Department of Physics, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030600, China;

2. State Key Laboratory of Widegap Semiconductor Optoelectronic Materials and Technologies,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Due to the difficulty in doping gallium oxide to achieve P-type, it is challenging to fabricate homogeneous PN junction diodes, which fail to meet the requirements for high-voltage Schottky diodes in high-power applications. A P-NiO/ β -Ga₂O₃ heterojunction Schottky diode structure based on P-NiO com-

【收稿日期】2025-07-07

【基金项目】山西省重点研发计划资助项目(202302030201001); 国家自然科学基金资助项目(62301509); 山西省基础研究计划青年项目(202203021212191); 国家自然科学基金专项资助项目(62441110)

【作者简介】刘晋花(2001—), 女, 硕士生, 主要从事氧化镓功率半导体器件研究。E-mail: 18235886701@163.com。

*【通信作者】李腾腾(1993—), 男, 副教授, 博士, 主要从事太赫兹功能器件、微纳光电材料与器件(探测传感方向)及基于第三代半导体材料的功率半导体器件研究。E-mail: litengteng@nuc.edu.cn。

李旺旺(1992—), 女, 讲师, 博士, 主要从事高温压力传感器研究。E-mail: 18434365707@163.com。

position is proposed. The electrical properties of 3 kinds of PN Schottky diodes with P-NiO protection ring, field plate-assisted P-NiO protection ring, and field plate-assisted junction barrier structure are mainly studied. Simulation results show that the field plate structure can effectively alleviate the electric field concentration effect. The reverse breakdown voltage of the field-aided barrier structure in the β -Ga₂O₃ PN junction diode shows significant improvement. Compared with the P-NiO protection ring structure (2 536.4 V) and the field-aided P-NiO protection ring structure (2 338.2 V), when the P-NiO doping concentration reaches $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, the breakdown voltage reaches 3 312 V, representing increases of 30.6% and 41.6% respectively. The device's power factor reaches 7.02 GW/cm², achieving a 100% improvement over conventional structures (3.51 GW/cm²) and demonstrating superior performance compared to other configurations, the maximum value of P-NiO protective ring structure (4.15 GW/cm²) was increased by 69.1%. The research in this paper provides a theoretical basis for the development of high-performance β -Ga₂O₃ SBD devices.

Key words: Ga₂O₃; schottky diodes; breakdown voltage; electric field concentration effect; power figure of merit

0 引言

作为新一代超宽禁带半导体的核心代表,氧化镓(Ga₂O₃)材料凭借其4.6~4.9 eV超宽带隙、8 MV/cm高临界电场(E_c)、可精确调控的N型掺杂(载流子浓度范围为 $10^{16} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)及熔体法制备4英寸及以上大尺寸单晶衬底的成本优势^[1],已成为高压功率器件领域极具变革潜力的核心材料。在各类Ga₂O₃功率器件中,垂直结构的Ga₂O₃肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)由于有效克服了横向器件固有的电流聚集效应与衬底寄生电阻问题,其工程化进程相较于其他器件结构更为领先。最新对比研究数据表明,垂直结构Ga₂O₃ SBD在功率品质因数方面展现出超越4H-SiC器件的理论优势,尤其在10 kV以上高压场景中优势更为显著^[2]。目前,国际前沿水平的Ga₂O₃垂直二极管已实现2.89 kV的击穿电压(Breakdown Voltage, BV)及约1 GW/cm²的直流功率品质因数(Power Figure of Merit, PFOM),但该性能仅达到其本征材料理论极限值的30%~40%^[3]。

为系统性提升Ga₂O₃ SBD的电学性能,学术界与产业界已广泛采用沟槽刻蚀、场板调制、高介电常数介质钝化及深能级受主掺杂等边缘终端技术,通过优化器件边缘电场分布以抑制提前击穿现象^[2-8]。然而,在 β -Ga₂O₃器件应用中,这些技术存在一定瓶颈。沟槽刻蚀工艺在采用氯基化学试剂时,容易在 β -Ga₂O₃刻蚀结构中引发电荷补偿

问题,导致导通电阻增大,并且(010)晶面尤其容易受到刻蚀损伤,刻蚀副产物还会影响沟槽深度一致性与侧壁均匀性^[9]。场板调制虽然能够调节电场,但如果参数设计不当,可能会引入新的电场集中点,同时增加器件电容,进而影响开关速度^[10]。与此同时,近期研究成果表明,PN结终端结构能够通过空间电荷区的电场调控机制,有效削弱电极边缘的电场集中效应^[11-12]。如在相关研究中,通过在器件边缘注入特定离子(如氦离子)形成高阻的“虚拟保护环”,能够有效缓解电场集中,该原理同样适用于 β -Ga₂O₃器件^[13]。然而,对于 β 相氧化镓(β -Ga₂O₃)这一最具实用价值的晶型而言,P型掺杂的实现始终是制约其器件性能突破的关键瓶颈^[14]。其根本原因在于 β -Ga₂O₃具有超大的禁带宽度,且其价带顶呈现极端平坦的色散特性,导致空穴有效质量极大,同时易引发严重的自补偿效应,使得在现有工艺条件下难以实现高浓度、高迁移率的Ga₂O₃ P型掺杂(P-Ga₂O₃)^[15]。为突破这一材料限制,当前研究普遍采用异质集成策略,即引入其他P型半导体材料与Ga₂O₃形成异质结终端结构,此类异质结终端的Ga₂O₃ SBD因其在耐压特性上的显著优势,已成为功率器件领域的研究热点^[5,16-19]。在众多候选材料中,NiO作为一种典型的宽禁带P型半导体,其3.8~4.2 eV的禁带宽度与Ga₂O₃形成良好的能量匹配(导带阶约为1.7 eV,价带阶约为1.4 eV,可有效抑制载流子反向注入),且具有较高的空穴浓度与稳定性,已被证实是替代P-Ga₂O₃的理想选择。目前,国内外多个研究团队已报道了P-NiO/

β -Ga₂O₃异质结肖特基二极管的研究成果^[20-21], 所制备的二极管已实现了数千伏的击穿电压和低比导通电阻($R_{on,sp}$)^[17-18,22-25]。

为了进一步详细研究P-NiO/ β -Ga₂O₃异质结肖特基二极管电学特性, 本文设计了具有P-NiO保护环、场板辅助P-NiO保护环以及场板辅助结势垒结构的3种终端结构, 重点研究了P型NiO掺杂浓度和厚度对以P-NiO为保护环的 β -Ga₂O₃基异质结二极管的正向导通特性和反向击穿特性的影响规律。本文为高耐压、高PFOM的Ga₂O₃SBD结构设计与工艺制备提供了重要理论依据, 同时为超宽禁带半导体异质集成器件的性能优化研究提供了新的技术路径与研究思路。

1 仿真模型

本文设计了3种Ga₂O₃SBD仿真结构, 如图

1所示。图1(a)为常规 β -Ga₂O₃SBD垂直结构图, 图1(b)为带有P-NiO作为保护环(Channel Blocking Layer, CBL)的 β -Ga₂O₃SBD结构图, 图1(c)为带有场板结构辅助P-NiO CBL的 β -Ga₂O₃SBD结构图, 图1(d)为场板辅助结势垒结构(Field Plate assisted Junction Barrier Schottky, FPJBS)的 β -Ga₂O₃SBD结构图。所有二极管的衬底为 β -Ga₂O₃(001)晶向高掺杂N型层(N⁺), 厚度50 μ m, 掺杂浓度 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 外延层为 β -Ga₂O₃(001)晶向低掺杂N型漂移区(N⁻), 厚度10 μ m, 掺杂浓度 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 阳极金属(Ni/Au)与Ga₂O₃接触面形成肖特基接触, 阴极金属(Ti/Au)与Ga₂O₃高掺杂衬底接触面形成欧姆接触。器件仿真具体结构参数如图1所示, 关键参数如下: CBL长度10 μ m, 场板宽度8 μ m, 结势垒终端结构中P-NiO区域长度4 μ m, 间隔7 μ m, 阳极直径50 μ m。

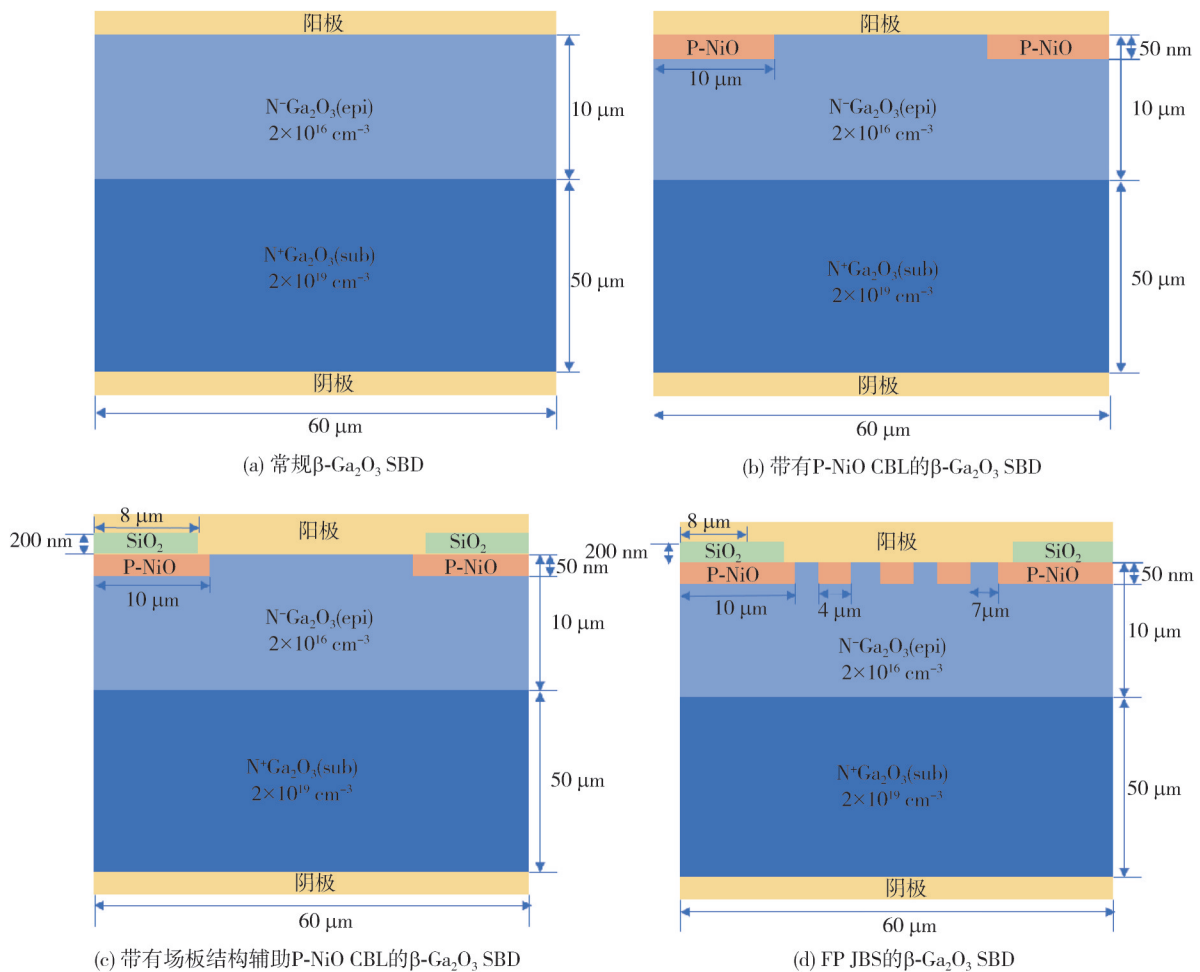


图 1 4种不同结构 β -Ga₂O₃SBD
Fig. 1 Four different structures of β -Ga₂O₃SBD

为了优化二极管结构并获得高击穿特性,仿真分析了器件在不同P-NiO掺杂浓度($3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)和厚度(20~100 nm)下的电学特性。为准确模拟器件,确保仿真结果的可靠性,本文通过查阅文献获取了NiO的关键材料参数^[17,20],如表1所示。在具体仿真中,NiO的禁带宽度选择4.0 eV。4.0 eV是该区间的典型值,且被广泛应用于与宽禁带半导体(如 Ga_2O_3 、 ZnO 等)的异质结仿真中,具有较好的实验验证基础。临界电场在仿真中采用5.5 MV/cm,该数值与 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的临界电场(8 MV/cm)匹配,可有效模拟异质结电场分布。

表1 NiO主要材料参数

Tab. 1 Material parameters of NiO for simulation

参数	数值
禁带宽度/eV	3.8~4.2
介电常数	11.8
电子亲和能/eV	1.8
有效电子质量	6
临界电场/(MV·cm ⁻¹)	4.8~6.2

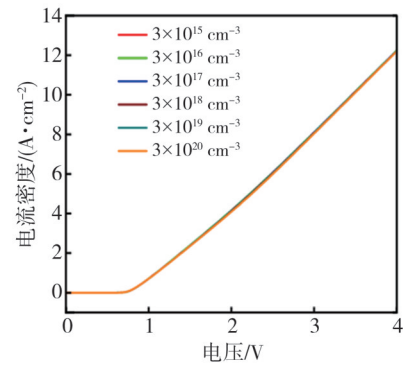
2 结果与讨论

2.1 NiO CBL P型掺杂浓度对器件电学特性的影响

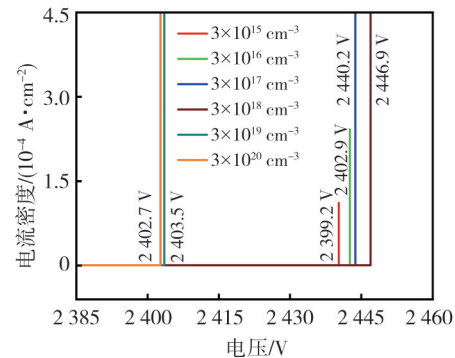
图1(b)为带有CBL结构的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD结构图,掺杂浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的N型 Ga_2O_3 作为衬底,掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度为10 μm 的N型 Ga_2O_3 薄膜作为外延层,阳极金属与轻掺杂外延层形成肖特基接触,仿真设置阳极金属功函数为4.7 eV,阴极金属与重掺杂衬底形成欧姆接触。在阳极下方两侧设置P-NiO CBL区,厚度50 nm,长度10 μm 。

为了探究P-NiO CBL的掺杂浓度对该结构电学特性的影响,本研究固定CBL区域厚度不变,通过改变P-NiO掺杂浓度开展仿真研究。图2(a)为掺杂浓度范围在 $3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 内的器件正向导通特性曲线。不同掺杂浓度下,器件开启电压(V_{th})和导通电阻(R_{on})均无显著变化, V_{th} 约为0.82 V,计算得出 R_{on} 约为 $1.56 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 。仿真常规 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD器件得到开启电压 V_{th} 为0.83 V,计算得出导通电阻 R_{on} 为 $1.4 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$,将图1(a)和(b)的仿真结果对比发现,P-NiO作为CBL的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD与常规 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD正向电学特性相比,开启电压和导通电阻值有所增加,原因是P-NiO/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结形成的界面势垒(约0.85 eV)略高于常规肖特

基势垒(0.83 eV),导致载流子注入难度增加。



(a) 正向导通特性



(b) 反向击穿特性

图2 不同NiO P型掺杂浓度对应的电学特性图

Fig. 2 Electrical characteristics of different NiO P-type doping concentrations

图2(b)为反向偏置下P-NiO不同掺杂浓度的器件反向击穿特性的仿真结果。当P-NiO掺杂浓度依次为 3×10^{15} 、 3×10^{16} 、 3×10^{17} 、 3×10^{18} 、 3×10^{19} 、 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件反向BV分别为2 442.5、2 443.7、2 440.2、2 446.9、2 402.9、2 399.2 V。由仿真结果可以得到,当P-NiO CBL掺杂浓度小于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件BV随着P-NiO CBL掺杂浓度的增加而增大;当P-NiO CBL掺杂浓度大于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件BV随着P-NiO CBL掺杂浓度的增加而减小;当P-NiO CBL掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,在未优化CBL厚度的条件下,器件BV达到最高值2 446.9 V,计算得对应PFOM为 5.79 GW/cm^2 。常规 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD仿真得到BV为2 216.93 V,计算得对应PFOM为 3.51 GW/cm^2 ,其计算公式为

$$PFOM = \frac{V_{\text{br}}^2}{R_{\text{on,sp}}}, \quad (1)$$

式中: V_{br} 为反向击穿电压; $R_{\text{on,sp}}$ 为导通电阻。

图3为不同P-NiO掺杂浓度的器件电场分布图,导致BV先变大再变小是由于P-NiO CBL掺

杂浓度改变引起击穿位置的改变。当掺杂浓度较低($3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)时,耗尽区向漂移层延展程度较小,击穿位置仍位于金属阳极边缘,随着掺杂浓度的增加,耗尽区逐渐向漂移层延展,CBL β -Ga₂O₃ 作用逐步增强,击穿位置从金属阳极边缘转移到阳极下方氧化镍P型掺杂区域与 β -Ga₂O₃ N

型掺杂区域交界处。P-NiO 浓度范围在 $3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,击穿位置附近耗尽区最为宽阔且平缓, BV 电压达到最大值;进一步增加掺杂浓度到 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 和 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,会使击穿位置逐步转移至P型CBL边角处,较前者区域平缓程度有所减弱, BV 随之降低。

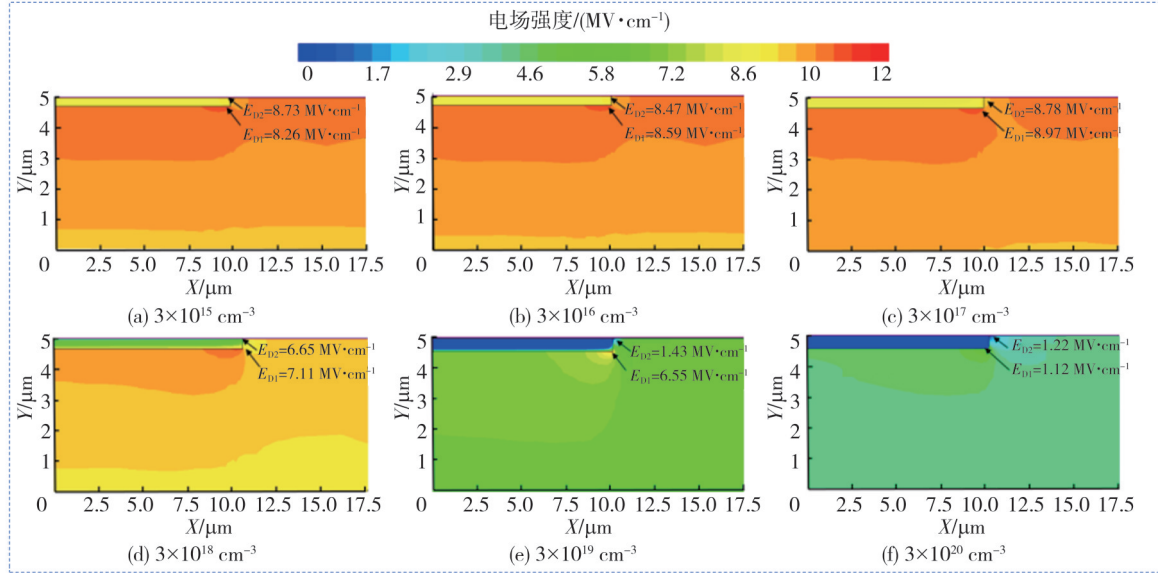


图 3 不同 P-NiO 掺杂浓度对应的电场分布图

Fig. 3 Electric field distribution diagram corresponding to different P-NiO doping concentrations

反向电学特性对比结果发现,P-NiO 作为 CBL 的 β -Ga₂O₃ SBD 的 BV 比常规 β -Ga₂O₃ SBD 有大幅提升。仿真结果表明,P-NiO CBL 的最优掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,此时器件 BV 较常规结构提升 10.4%, $PFOM$ 提升 65%,验证了该结构在改善器件直流性能上的有效性,并为 CBL 参数优化提供了量化依据。

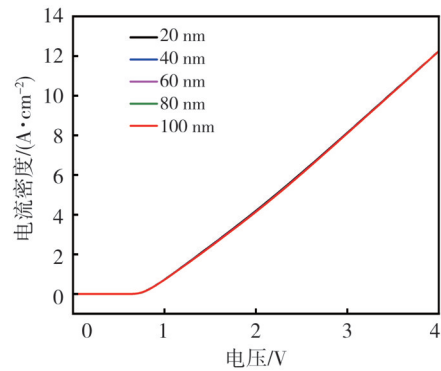
2.2 P-NiO CBL 厚度对器件电学特性的影响

为了进一步分析 NiO 厚度对 β -Ga₂O₃ SBD 器件击穿特性的影响规律,采用如图 1(b) 所示结构,并保持 P-NiO 掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的最优数值不变,调整 P-NiO 厚度对结构进行电学特性仿真。

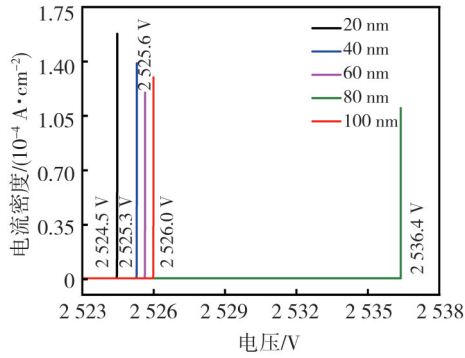
图 4(a) 为 CBL 厚度范围在 20~100 nm 变化时器件的正向特性曲线。计算出不同 CBL 厚度下,器件的导通电阻均为 $1.55 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$,器件开启电压 V_{th} 稳定在 1.04 V,这表明表面 P-NiO 厚度对器件的正向导通特性即导通电阻和开启电压的影响不明显。

图 4(b) 为器件反偏下 CBL NiO 厚度与器件反向特性变化曲线。由仿真结果可知,当 P-NiO

厚度依次为 20, 40, 60, 80, 100 nm 时,器件反向 BV 分别为 2 524.5, 2 525.3, 2 525.6, 2 536.4, 2 526.0 V。当 P-NiO 厚度小于 80 nm 时,器件 BV 随着 P-NiO CBL 厚度的增加而增大;当厚度大于 80 nm 时,器件 BV 随着 P-NiO CBL 厚度的增加而减小;厚度为 80 nm 时,器件 BV 达到最高值 2 536.4 V,对应 $PFOM$ 为 4.15 GW/cm^2 。随 P-NiO 厚度变化, $PFOM$ 趋势与 BV 一致,在 80 nm 时达到最大值,较 20 nm 厚度提升约 0.4 GW/cm^2 。



(a) 正向导通特性



(b) 反向击穿特性

图4 不同P-NiO厚度对应的电学特性图

Fig. 4 Electrical characteristics corresponding to different P-NiO thicknesses

为了探究CBL对BV产生影响的原因,对在

不同P-NiO厚度下所对应的电场分布情况进行了分析,如图5所示。加入CBL后的器件,其P-NiO与N型Ga₂O₃扩散层形成的耗尽区主要承担所施加的反偏电压,在P-NiO CBL底角处电场达到峰值,易发生击穿。若CBL厚度较小,P-NiO易穿通,器件反向BV小,耐压特性差;当厚度增大,器件变得不易击穿,则反向BV变大,耐压性能显著提升;厚度进一步增大,底角处的电场集中效应变得更明显,击穿电压再次下降。综上所述:P-NiO CBL的最优厚度为80 nm,此时器件在保持低导通电阻的同时,实现2 536.4 V的BV及4.15 GW/cm²的PFOM,该结果为β-Ga₂O₃ SBD CBL工艺设计提供了量化参考。

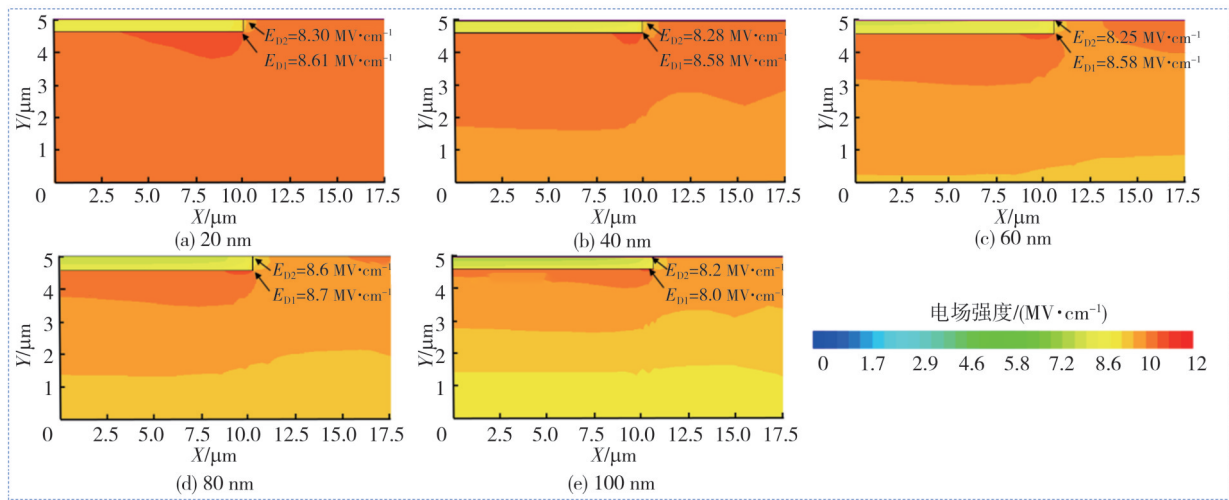


图5 不同P-NiO厚度对应的电场分布图

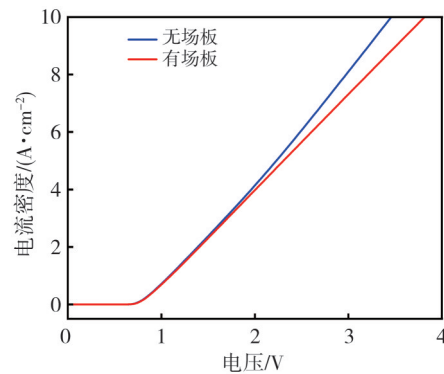
Fig. 5 Electric field distribution corresponding to different P-NiO

2.3 场板结构对器件电学特性的影响

电场集中效应是直接影响SBD反向特性的重要因素,它严重限制了SBD的击穿电压,同时使得反向漏电流增加,进而大幅降低电子器件的可靠性,甚至可能会严重影响器件寿命。场板结构可极大改善SBD的电场集中效应,同时拥有工艺实现简易、面积小和成本低等优点,综合而言具备极佳的应用性价比。

对图1(c)场板结构辅助P-NiO CBL的β-Ga₂O₃ SBD结构进行器件正向特性仿真,根据P-NiO CBL结构仿真结果,选取其性能最优参数,固定P-NiO区域掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度为80 nm。再添加场板结构,其仿真的正向导通特性曲线如图6(a)所示。从仿真结果可知:开启电压约为0.81 V,与无场板结构基本一致,计算

得出导通电阻约为 $1.81 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ 。图6(b)为带有场板的CBL结构的β-Ga₂O₃ SBD结构对应的反向击穿特性曲线。仿真结果可知BV为2 338.2 V,计算对应PFOM为 $5.32 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。



(a) 正向导通特性

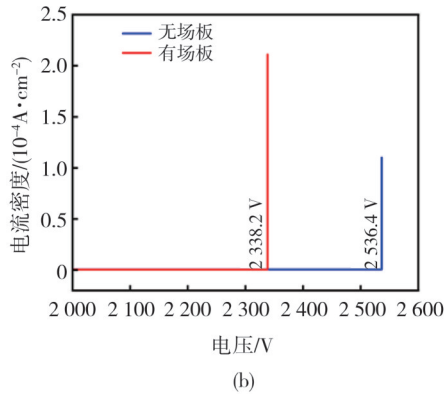


图 6 有场板结构和无场板结构的 β -Ga₂O₃ SBD 的电学特性图
Fig. 6 Electrical characteristics of β -Ga₂O₃ SBDs with and without field plates

以上仿真结果表明,加入 P-NiO CBL 结构的 β -Ga₂O₃ SBD 有效提高了传统器件的 BV , 观察

图 7 电场峰值对比图及图 8 电场分布图可知,在肖特基结耗尽区两侧的电场强度很高,电场集中效应明显,导致局部电场过高,容易引发过早击穿,增大反向漏电流。

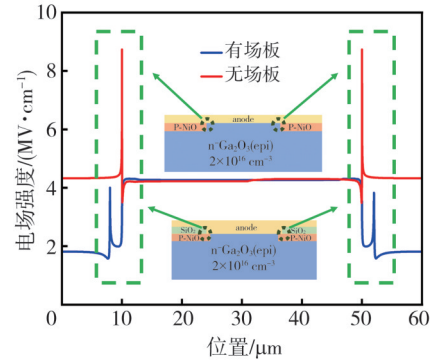


图 7 保护环结构与场板辅助保护环结构的电场峰值对比图
Fig. 7 Comparison of peak electric field of protective ring structure and auxiliary protective ring structure of field plate

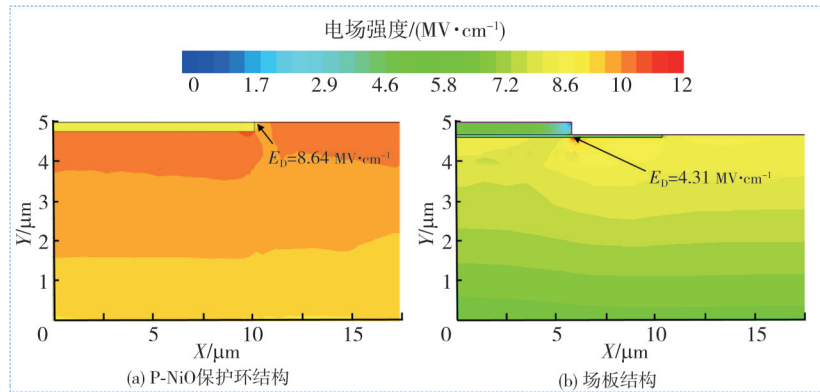


图 8 保护环结构与场板辅助的保护环结构电场分布图

Fig. 8 Structure of protective ring and electric field distribution of auxiliary protective ring structure of field plate

而加入场板结构后,将电场峰值转移至场板介质边缘处,电场峰值从阳极边缘的 8.64 MV/cm 降低至场板介质边缘的 4.31 MV/cm, 研究表明,场板结构可以有效改善阳极边缘处所产生的电场集中效应。

2.4 结势垒终端结构对器件特性的影响

在图 1(c) 结构基础上于阳极下方注入 3 个长 4 μ m, 间隔 7 μ m 的 P-NiO 区域, 设计出图 1(d) 的 FP JBS β -Ga₂O₃ SBD。P-NiO 厚度取之前仿真的最优参数 80 nm, 改变掺杂浓度进行仿真。

图 9(a) 为掺杂浓度范围在 $3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 内的器件正向导通特性曲线, 对应开启电压均为 0.8 V, 计算可得不同掺杂浓度导通电阻均为 1.58 $\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ 。可以得出不同掺杂浓度对器件正向电学特性几乎无影响, 与基础结构、

CBL 结构以及带场板结构的 β -Ga₂O₃ SBD 相比有明显降低。

图 9(b) 为掺杂浓度范围在 $3 \times 10^{15} \sim 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 内的器件反向击穿特性曲线。由仿真结果可以得到, 当 P-NiO 掺杂浓度小于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件 BV 随着 P-NiO 掺杂浓度的增加而增大; 当 P-NiO 掺杂浓度大于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件 BV 随着 P-NiO 掺杂浓度的增加而减小; 当 P-NiO 掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件 BV 达到最高值 3 312.0 V, 计算得对应 $PFOM$ 为 7.02 GW/cm^2 , 较 CBL 结构最高值 (4.15 GW/cm^2) 提升 69.1%, 较带场板结构 (5.32 GW/cm^2) 提升 32.0%, 显著优于其他结构。仿真分析表明, 通过在阳极下方的扩散层中注入若干较窄的均匀掺杂的 P 型区, 可以提高器件的反向击穿电压。FP JBS SBD 的反向击穿电压随 P-NiO 掺杂浓度先增后减的趋势

与CBL结构的研究结果一致,其本质均为通过调控P-NiO/ β -Ga₂O₃异质结的空间电荷区宽度与电场分布实现性能优化。不同的是,结势垒终端结构通过多P区的协同耗尽效应,进一步分散电场,故BV提升更显著(较CBL结构最高值提升35.9%)。

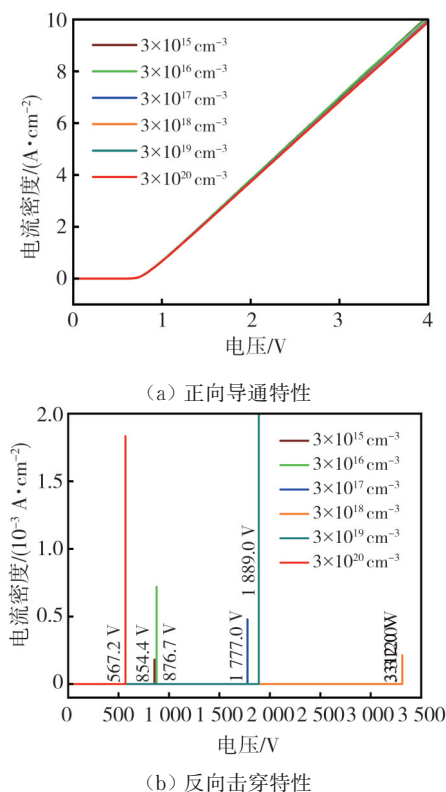


图9 P-NiO掺杂浓度对FP JBS结构电学特性的影响
Fig. 9 Effect of P-NiO doping concentration on electrical properties of FP JBS structure

3 结论

本文针对 β -Ga₂O₃ SBD存在电场集中效应、影响反向击穿电压的问题,通过Sentaurus TCAD软件仿真,采用加入场板及P-NiO CBL的方式进行优化设计,并分析器件电学特性。研究发现,加入P-NiO设计的带有CBL终端结构的 β -Ga₂O₃ SBD,其反向特性与P-NiO CBL掺杂浓度及厚度相关。当P-NiO掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,BV达2 446.9 V;CBL厚度为80 nm时,反向BV提升至2 536.4 V,较常规器件2 216.93 V提升14.4%,验证了P-NiO CBL对器件性能的优化作用。3种终端结构中,引入P型NiO阵列形成的FP JBS为参数最优的终端结构:当P-NiO掺杂浓度为 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件BV可达3 312.0 V,

PFOM为7.02 GW/ cm^2 ,较CBL结构最高值(4.15 GW/ cm^2)提升69.1%。综上所述,引入P-NiO CBL结构和结势垒结构可显著提升 β -Ga₂O₃ SBD的BV,场板结构可改善边缘电场集中效应。本文明确了P-NiO CBL的最优参数及结势垒终端结构的优势,为高性能 β -Ga₂O₃ SBD的结构设计与工艺优化提供了理论依据。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] PEARTON S J, YANG J, CARY P H IV, et al. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices [J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1): 011301.
- [2] DONG P, ZHANG J, YAN Q, et al. 6 kV/3.4 mΩ·cm² Vertical β -Ga₂O₃ Schottky barrier diode with BV²/R_{on,sp} performance exceeding 1-D unipolar limit of GaN and SiC [J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(5): 765-768.
- [3] LI W, NOMOTO K, HU Z, et al. Field-plated Ga₂O₃ trench Schottky barrier diodes with a BV²/R_{on,sp} of up to 0.95 GW/cm² [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(1): 107-110.
- [4] KONISHI K, GOTO K, MURAKAMI H, et al. 1-kV vertical Ga₂O₃ field-plated Schottky barrier diodes [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(10): 103506.
- [5] ALLEN N, XIAO M, YAN X, et al. Vertical Ga₂O₃ Schottky barrier diodes with small-angle beveled field plates: a baliga's figure-of-merit of 0.6 GW/cm² [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(9): 1399-1402.
- [6] ROY S, BHATTACHARYYA A, RANGA P, et al. High-k oxide field-plated vertical (001) β -Ga₂O₃ Schottky barrier diode with baliga's figure of merit over 1 GW/cm² [J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(8): 1140-1143.
- [7] LIN C H, YUDA Y, WONG M H, et al. Vertical Ga₂O₃ Schottky barrier diodes with guard ring formed by nitrogen-ion implantation [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(9): 1487-1490.
- [8] HE Q, ZHOU X, LI Q, et al. Selective high-resistance zones formed by oxygen annealing for-GaO Schottky diode applications [J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(11): 1933-1936.
- [9] DHARA S, DHEENAN A, RAJAN S. Charge

- recovery by vacuum annealing in β -Ga₂O₃ multi-fin trench Schottky barrier diodes [J]. APL Electronic Devices, 2025, 1(2): 026122.
- [10] XING H, DORA Y, CHINI A, et al. High breakdown voltage AlGaIn-GaN HEMTs achieved by multiple field plates [J]. IEEE Electron Device Letters, 2004, 25(4): 161-163.
- [11] KIM S, SEOK O. Designs of charge-balanced edge termination structures for 3.3 kV SiC power devices using PN multi-epitaxial layers [J]. Micromachines, 2025, 16(1): 47.
- [12] LEE S H, CHA H Y. Design of trench MIS field plate structure for edge termination of GaN vertical PN diode [J]. Micromachines, 2023, 14(11): 2005.
- [13] HAN J, SUN N, PEI X, et al. 3.0 kV β -Ga₂O₃-based vertical p-n heterojunction diodes with helium-implanted edge termination [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2025, 72(6): 2879-2883.
- [14] SPENCER J A, MOCK A L, JACOBS A G, et al. A review of band structure and material properties of transparent conducting and semiconducting oxides: Ga₂O₃, Al₂O₃, In₂O₃, ZnO, SnO₂, CdO, NiO, CuO, and Sc₂O₃ [J]. Applied Physics Reviews, 2022, 9(1): 011315.
- [15] VASQUEZ J M T, ASHAI A, LU Y, et al. A self-powered and broadband UV PIN photodiode employing a NiO_x layer and a β -Ga₂O₃ heterojunction [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(6): 065104.
- [16] YANG J, REN F, TADJER M, et al. 2300V reverse breakdown voltage Ga₂O₃ Schottky rectifiers [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2018, 7(5): 92-96.
- [17] LU X, ZHOU X, JIANG H, et al. 1-kV sputtered p-NiO/n-Ga₂O₃ heterojunction diodes with an ultra-low leakage current below 1 μ A/cm² [J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(3): 449-452.
- [18] GONG H H, CHEN X H, XU Y, et al. A 1.86-kV double-layered NiO/ β -Ga₂O₃ vertical p-n heterojunction diode [J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(2): 022104.
- [19] KOKUBUN Y, KUBO S, NAKAGOMI S. Al-oxide p-n heterojunction diodes comprising p-type NiO and n-type β -Ga₂O₃ [J]. Applied Physics Express, 2016, 9(9): 091101.
- [20] GONG H H, YU X X, XU Y, et al. β -Ga₂O₃ vertical heterojunction barrier Schottky diodes terminated with p-NiO field limiting rings [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(20): 202102.
- [21] LU Y M, HWANG W S, YANG J S. Effects of substrate temperature on the resistivity of non-stoichiometric sputtered NiO_x films [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 155(2/3): 231-235.
- [22] WANG Y, GONG H, LV Y, et al. 2.41 kV Vertical P-NiO/n-Ga₂O₃ heterojunction diodes with a record baliga's figure-of-merit of 5.18 GW/cm² [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3743-3746.
- [23] LI J S, CHIANG C C, XIA X, et al. Demonstration of 4.7 kV breakdown voltage in NiO/ β -Ga₂O₃ vertical rectifiers [J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(4): 042105.
- [24] HAO W, HE Q, ZHOU X, et al. 2.6 kV NiO/Ga₂O₃ heterojunction diode with superior high-temperature voltage blocking capability [C]//2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2022: 105-108.
- [25] ZHANG J, DONG P, DANG K, et al. Ultra-wide bandgap semiconductor Ga₂O₃ power diodes [J]. Nature Communications, 2022, 13: 3900.