文章编号: 1007－4252(2025)01－0056－08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0004

复合终端下 n-Ga_2O_3 异质肖特基二极管的结构设计及优化

马豪威, 朱敏敏*
(福州大学物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘要: 氧化镓 (Ga_2O_3) 作为一种新型的超宽禁带半导体材料, 具有高达 4.8 eV 的禁带宽度和 8 MV/cm 的临界击穿场强, 这一特点很好地匹配了功率器件的性能要求。但是由于氧化镓的 p 型掺杂技术的缺失, 氧化镓同质结器件的实现较为困难。基于此, 本文提出采用 p-NiO/n-Ga_2O_3 异质结所构成的结势垒肖特基二极管 (Junction Barrier Schottky, JBS), 并与场板 (Field Plate, FP) 及阶梯型终端 (Mase) 进行复合, 以提升其性能。为了对器件设计及制备提供理论指导, 应用 TCAD 仿真软件对其进行了仿真研究。研究发现, 与基础肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD) 相比, 采用复合终端的 SBD 的击穿电压由 887 V 增加至 3 069 V, 同时正向导通电阻由 3.975 mΩ·cm^2 略微增加至 5.395 mΩ·cm^2。此外, 本文探讨了 p-NiO 掺杂浓度和厚度对器件性能的影响。结果证明, 复合终端结构有效改善了器件的反向击穿性能, 并且为器件性能的优化提供了理论指导。

关键词: Ga_2O_3 -SBD; 复合终端结构; 异质结; 击穿电压
中图分类号: TN403 **文献标志码:** A

Design and optimization of the structure for n-Ga_2O_3 Schottky barrier diode with composite terminations

MA Haowei, ZHU Minmin*
(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Gallium oxide (Ga_2O_3), as a novel ultra-wide bandgap semiconductor material, possesses a bandgap of up to 4.8 eV and a critical breakdown field strength of 8 MV/cm, making it highly satisfy the requirements of power devices. However, the lack of p-type doping technology in Ga_2O_3 poses significant challenges to the realization of Ga_2O_3 homojunction devices. To address this problem, this study proposes a Junction Barrier Schottky (JBS) diode based on a p-NiO/n-Ga_2O_3 heterojunction, combined with field plates (FP) and mesa terminations, to enhance the DC performance of this device. TCAD simulation software was employed to provide theoretical guidance for the device design and fabrication. The results

收稿日期: 2024−11−09; **修订日期:** 2025−01−22
基金项目: 福建省科技厅对外合作重点项目 (No.2022I0006).
作者简介: 马豪威 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为氧化镓功率器件 (E-mail: 221120124@fzu.edu.cn).
通信作者: 朱敏敏 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为半导体微纳电光器件与集成电路 (E-mail: mmzhu@fzu.edu.cn).

indicate that compared to a basic Schottky barrier diode (SBD), the breakdown voltage of the SBD with composite terminations increases from 887 V to 3 069 V, with a slight increase in the forward conduction resistance from 3.975 mΩ·cm² to 5.395 mΩ·cm². Furthermore, the influence of p-NiO doping concentration and thickness on device performance was investigated. The present work demonstrats that the composite terminal structure effectively improves the reverse breakdown characteristics and provides theoretical insights for optimizing device performance.

Key words: Ga_2O_3-SBD; composite terminal structure; heterojunction; breakdown voltage.

0　引言

氧化镓具有高达 4.8 eV 的禁带宽度以及 8 MV/cm 的临界击穿场强, 很好地契合了功率器件的应用需求。除卓越的性能优势外, 氧化镓还是宽禁带半导体中唯一能够采用液相熔体法生长的材料。相比于 SiC、GaN 材料所采用的气相法, 液相熔体法可以显著降低氧化镓应用中的制备成本。这些优势, 使得氧化镓在日盲紫外探测器[1]以及功率器件领域具有广阔的发展前景。然而, 氧化镓在 p 型掺杂技术的实现上面临着重大挑战, 这主要归因于几个关键问题: n 型背景载流子的自补偿效应、受主能级缺乏以及受主离子易钝化等[2-6]。因此, 基于氧化镓的功率器件研究主要集中在肖特基二极管 (Schottky Barrier Diode, SBD) 和金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)[7]等单极型器件上。对于 SBD 而言, 由于肖特基接触边缘存在电场集中效应, 往往在接触边缘出现提前击穿的情况, 导致其实际性能远低于氧化镓材料的理论极限。为缓解这一问题, 可在器件中引入边缘终端结构, 包括斜面终端[8, 9]、离子注入终端[10]、场板终端[11-13]等, 以改善其电场分布, 实现对器件击穿性能的优化。然而, 即便采用这些优化措施, 基于氧化镓的 SBD 性能仍与其理论极限有较大差距。

本文提出, 通过在肖特基二极管中引入 PN 结终端、场板终端 (Field Plate, FP) 及阶梯终端 (Mesa) 并对其进行联合优化设计, 以缓解肖特基接触边缘的电场集中效应。这种方法的优势在于, 能够通过调整 p 型区域各项结构参数来改善器件的正向导通特性和反向击穿特性。同时, 场板终端与阶梯终端亦可辅助调控内部电场分布, 且具有易于实现的优点。本研究基于 Sentaurus TCAD 仿真, 系统分析了 p-NiO/n-Ga_2O_3 异质结势垒终端、阶梯终端及场板终端的复合设计对 Ga_2O_3-SBD 正反向特性的影响机制, 并引入功率优值 (Power Figure of Merit, P-FOM) 来综合考量器件的性能, 以确定 p-NiO 厚度、掺杂浓度以及其与阳极的交叠长度的最佳数值:

$$\mathrm{P-FOM} = V_B^2 / R_{on} \tag{1}$$

其中 V_B 为器件击穿电压, R_{on} 为器件导通电阻。

研究结果表明, 采用复合终端设计的氧化镓肖特基二极管的性能有了显著提升, 其击穿电压由 887 V 显著提升至 3 069 V, 同时导通电阻由 3.975 mΩ·cm² 略微增加至 5.395 mΩ·cm²。此外, p-NiO 区域的厚度和掺杂浓度对器件的直流性能具有明显影响。通过仿真研究和优化设计, 本文对复合终端结构下 Ga_2O_3-SBD 的特性进行了深入的理论分析, 为氧化镓功率 SBD 的设计以及实验制备提供了重要的理论指导。

1　SBD 结构设计与工艺流程

本文设计的器件结构主要由 n-Ga_2O_3、p-NiO

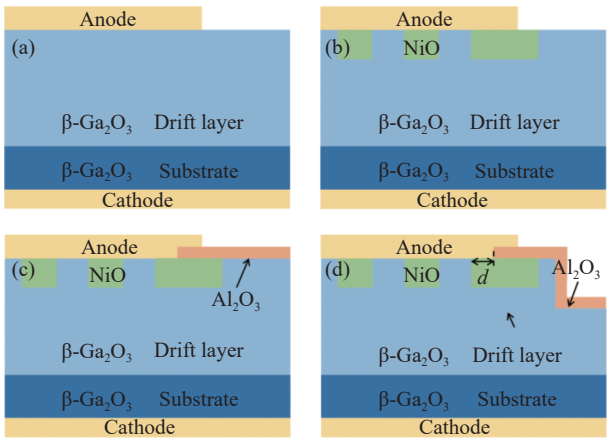

图 1　(a) 基础 SBD、(b) JBS、(c) FP JBS、(d) FP Mesa JBS 的二维结构示意图

Fig. 1　2D structure diagram of (a) basic SBD, (b) JBS, (c) FP JBS, and (d) FP Mesa JBS.

和介质层组成。具体优化路径如图 1 所示，从基础 SBD 结构逐步发展到复合场板、结势垒以及阶梯终端的 Ga_2O_3-SBD (FP Mesa JBS)。器件的主要结构参数如下：氧化镓衬底掺杂浓度为 1.0×10^{18} cm^{-3}；氧化镓外延层掺杂浓度为 1.5×10^{16} cm^{-3}，厚度为 7.7 μm；p-NiO 区域间距及阳极金属覆盖下的 p-NiO 区域宽度均为 4 μm，阳极边界附近的 p-NiO 区域宽度为 10 μm，并且尾端 p-NiO 与阳极的交叠长度为 2 μm，所有 p-NiO 的掺杂浓度一致。阳极采用肖特基接触，阴极为欧姆接触；器件结构中，场板与 Ga_2O_3 表面之间的介质则选用 Al_2O_3。

本文对器件的直流性能、电场分布情况进行了模拟。为准确地模拟器件内部出现的各种物理现象以确保仿真结果的可靠性，本文通过查阅文献获取了 NiO 和 β-Ga_2O_3 的关键材料参数[14, 15]。其具体数值如表 1 所示。其中，NiO 的临界击穿电场强度可以通过半导体中带隙和击穿电场之间的关系估算得到[16]：

$$E_C = 1.73\times10^5 (E_G)^{2.5} \quad (2)$$

其中 E_C 材料的临界击穿场强，E_G 为材料禁带宽度。

表 1 仿真所使用的 Ga_2O_3 及 NiO 材料参数

Table1 Material parameters of Ga_2O_3 and NiO for simulation

材料名称	Ga_2O_3	NiO
禁带宽度 (eV)	4.85	3.7
电子亲和能 (eV)	4	1.8
相对介电常数	10	11.8
电子迁移率 (cm^2/V s)	160	-
空穴迁移率 (cm^2/V s)	-	0.92
有效电子质量(m_0)	0.28	-
有效空穴质量(m_0)	-	6
电子饱和速度 (cm/s)	2×10^7	-

此外，本文在复合终端结构的设计中充分考虑了工艺可行性。具体工艺流程如图 2 所示：首先，利用金属有机化合物化学气相沉积法 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 在氧化镓衬底上沉积一层 n-Ga_2O_3 外延层[17, 18]，然后通过光刻工艺暴露出 p 型区域的窗口。接着，通过刻蚀工艺在氧化镓外延层表面刻蚀出凹槽 (为了实现刻蚀的高方向性，主要采用干法刻蚀；研究表明，氧化镓的干法刻蚀速率可达 1250 nm/min[19, 20])。随后，通过磁控溅射法二次沉积 p-NiO，以填满凹槽，形成基于异质 PN 结的结扩展终端[21, 22]；之后，在 Ga_2O_3 外延层与场板之间沉积 Al_2O_3 介质层，最后用电子束蒸发金属形成金属电极和场板。

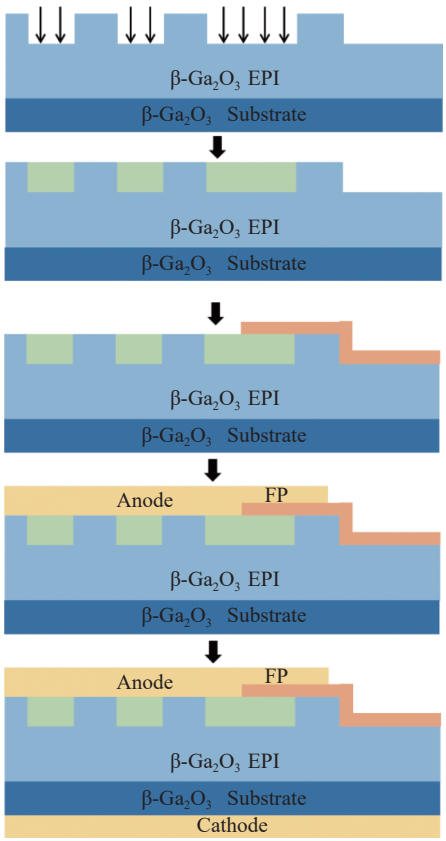

图 2 具有结势垒-场板-阶梯型复合终端结构的垂直 Ga_2O_3-SBD 工艺流程图

Fig. 2 Process flowchart of vertical Ga_2O_3 FP Mesa JBS

2 仿真研究

2.1 结势垒、场板及阶梯终端的复合对的 SBD 正反向特性的影响

如图 3 所示，通过仿真得到的结果显示，具有不同终端结构的 Ga_2O_3-SBD 的导通电压大致都为 0.85 V 左右。而随着结势垒、场板、阶梯终端的植入，器件的击穿电压由 887 V 逐步升至 3069 V，其导通电阻则升高至 5.395 mΩ·cm^2。综合来看，器件 P-FOM 数值随着终端结构的植入而逐步增加，证明了该复合结构用于改善器件直流性能的可

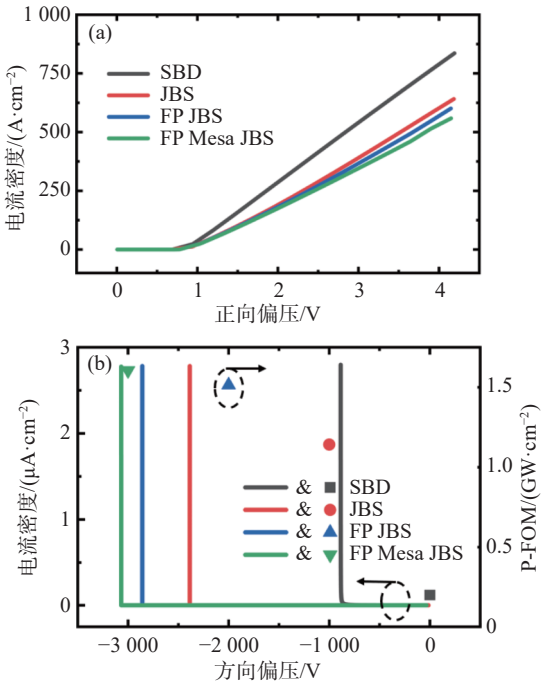

图 3　SBD, JBS, FP JBS 以及 FP Mesa JBS 的 (a) 正向特性曲线以及 (b) 击穿特性曲线对比图

Fig. 3 Comparison of (a) forward and (b) breakdown characteristics of vertical SBD, JBS, FP JBS and FP Mesa SBD

行性。

2.2　复合终端提升击穿性能的内在机理

基础结构的 SBD 在外加反向偏置下, 容易在器件表面阳极边缘处出现电场集中效应, 从而使得 SBD 在此处提前发生击穿。图 4(a) 所示的基础 SBD 在击穿电压 (887 V) 下的内部电场分布情况可

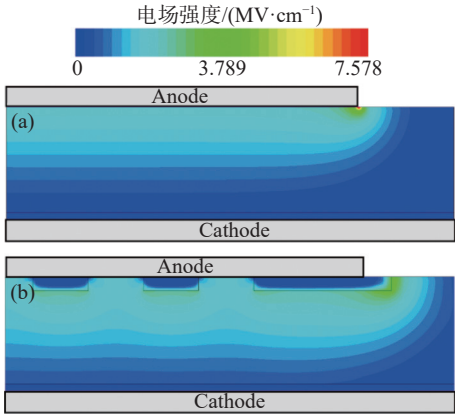

图 4　(a) 基础 SBD 以及 (b) JBS 在 887 V 的反向电压下的器件内部电场分布图

Fig. 4 Electric field distribution diagram of vertical (a) basic SBD and (b) JBS under reverse bias of 887 V

以验证这一观点。所以本文采用了结势垒终端、场板终端以及阶梯型终端复合结构, 通过它们的共同作用来优化器件性能。

首先, 我们可以将 p-NiO 植入在器件阳极下方, 以形成结势垒肖特基二极管。如图 1(b) 所示, 传统 JBS 是在常规 SBD 的阳极下方引入周期性的 PN 结。如图 4(b)所示, JBS 的峰值电场由器件表面处转移至 PN 结界面, 以此实现了击穿位置的转移。在同一反向偏压下, 器件内部的峰值电场强度由 7.578 MV/cm 降低至 4.052 MV/cm, 大大缓解了器件的电场集中效应。

如图 5 可知, 在同一反向偏置下, 在引入 JBS 后阳极下方的电子密度有所减小。这一现象归因于引入的 PN 结所形成的耗尽区域随着反向偏压的增大而不断出现的扩展, 并最终发生重叠。此过程有效地屏蔽了电场对肖特基接触的直接作用, 从而抑制了势垒降低效应的发生, 进而实现了对泄漏电流的有效抑制。

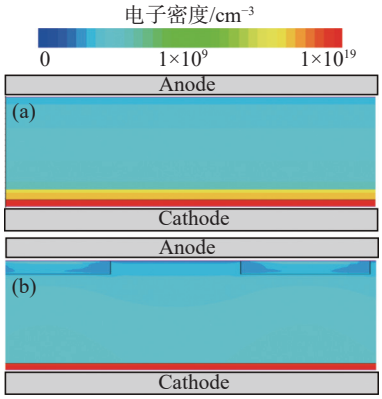

图 5　(a) 基础 SBD 与(b)JBS 在反向偏压为 500 V 时的电子密度分布图像

Fig. 5 Electron density diagram of vertical (a) basic SBD and (b) JBS under reverse bias of 500 V

如图 3(b) 所示, 通过 PN 结终端的植入, SBD 的击穿电压提升至 2386 V。此外, 在正向导通的情况下肖特基结的势垒通常会低于 PN 结势垒, 所以 JBS 的导通电压与基础 SBD 的导通电压相差无几; 但同时, 肖特基接触的面积减低也导致了导通电阻的上升。但相较于 SBD 反向击穿电压的巨大提升, 正向特性的略微退化在可接受范围内。综上所述, JBS 结构结合了肖特基结和 PN 结的优点, 从而获得比 PN 二极管更低的开启电压以及比 SBD 更高的击穿电压。

除此之外，本文还通过在 JBS 终端中进一步复合场板终端以及阶梯型终端结构，使之共同作用以优化器件内部的电场分布情况。如图 6 所示，阶梯型终端结构改善器件的击穿性能的原理是：阶梯型终端结构同样可以在一定程度上扩展耗尽区，以此减少漂移层中过剩的 β-Ga_2O_3 阳离子，从根源上减少了载流子的碰撞电离效应。

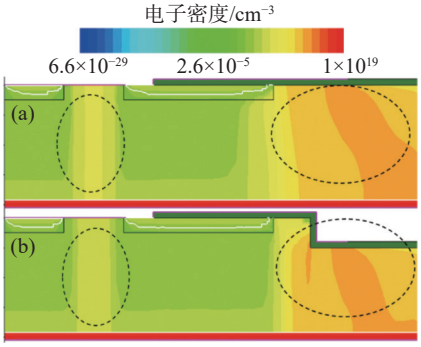

图 6 (a)FP JBS 与(b)FP Mesa JBS 在反向偏压为 2500 V 时的电子密度分布图像

Fig. 6 Electron density diagram of vertical (a) FP JBS and (b) FP Mesa JBS under reverse bias of 2500 V

2.3 p-NiO 掺杂浓度对复合 SBD 的影响

本研究还对具有不同 p-NiO 掺杂浓度的复合 SBD 进行击穿特性的仿真，并分析了在同一反向偏压下不同掺杂浓度器件的电场分布情况。在仿真中，将 p-NiO 的掺杂浓度设为变量，其余结构参数均保持不变，得到器件的击穿特性 (如图 7 所示)，并对比其性能，从中优选出 p-NiO 掺杂浓度的最优值。具体而言，对比了 p-NiO 的掺杂浓度分别为 5.0×10^{16} cm^{-3}、1.0×10^{17} cm^{-3}、4.0×10^{17} cm^{-3}、5.0×10^{17} cm^{-3}、8.0×10^{17} cm^{-3} 时的击穿电压。由图 7 可知，p-NiO 掺杂浓度对复合 SBD 存在一定程度的影响。器件击穿电压随着 p-NiO 掺杂浓度的增加呈现出先增大后减小的趋势，并在 p-NiO 掺杂浓度为 4.0×10^{17} cm^{-3} 时达到最大值。

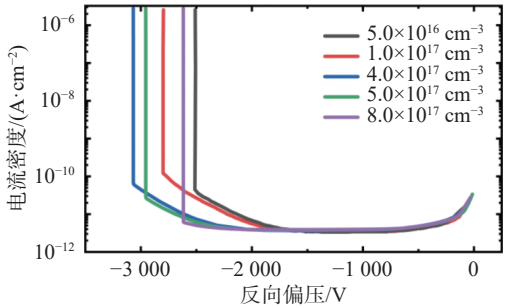

图 7 不同 p-NiO 掺杂浓度所对应的复合终端 Ga_2O_3-SBD 的反向击穿特性

Fig. 7 Breakdown characteristics of Ga_2O_3-SBD with different doping concentration in p-NiO.

图 8 为在 2600 V 的反向偏压下，p-NiO 区域具有不同掺杂浓度的器件沿异质结界面处的水平电场分布曲线。从该图可知，复合 SBD 内部电场集中于各个异质结界面边缘，其中与阳极边缘接触的异质结界面电场强度相对较高，而 p-NiO 掺杂浓度过大或者过小均会加剧这种差异。换言之，过大或者过小的 p-NiO 掺杂浓度均会引起内部电场在尾端的异质结界面边缘处的集中。

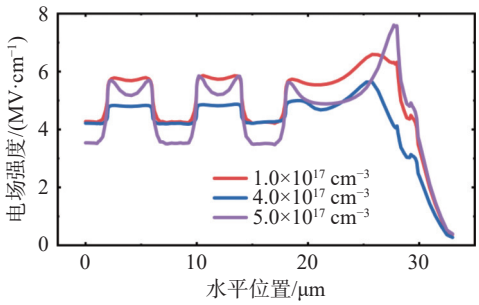

图 8 不同 p-NiO 掺杂浓度所对应的复合终端 Ga_2O_3- SBD 在 2600 V 的反向偏压下沿 p-NiO/n-Ga_2O_3 界面水平方向的电场分布情况

Fig. 8 The electric field distribution along the interface of p-NiO/n-Ga_2O_3 with different doping concentration in p-NiO under reverse bias of 2600 V in the horizontal direction.

2.4 p-NiO 厚度对复合 SBD 的影响

对具有不同 p-NiO 厚度的复合终端结构垂直 Ga_2O_3-SBD 器件进行了击穿特性的仿真研究。将 p-NiO 的厚度 (H_{NiO}) 作为变量，保持其他结构参数不变，系统分析了不同 p-NiO 厚度下器件的击穿特性和正向特性(如图 9 所示)，并根据仿真结果，选出最优的 H_{NiO} 值。综合考虑工艺可行性与理论分析，选取了 H_{NiO} 为 0.5 μm、1.0 μm 和 1.5 μm 进行对比分析。从图 9 可以看出，H_{NiO} 对器件的直流特性具有显著影响。器件击穿电压随着 H_{NiO} 的增大呈现出先增大后减小的趋势，在 H_{NiO}=1.0 μm 时，器件的击穿电压达到最大值，为 3069 V；而随着 H_{NiO} 增大，导通电阻也随之上升。在 H_{NiO}=0.5 μm 时，导通电阻为 5.066 mΩ·cm²。

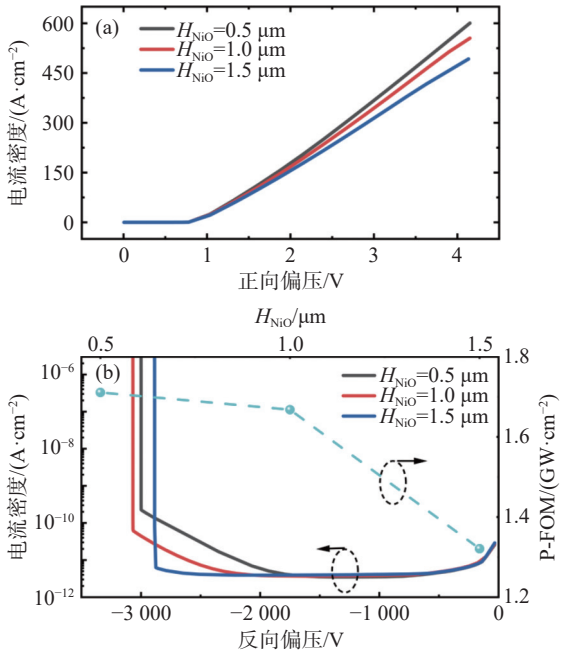

图 9　不同 p-NiO 厚度所对应的复合终端 Ga_2O_3-SBD 的 (a) 正向特性以及 (b) 击穿特性对比

Fig. 9 Comparison of (a) forward and (b) breakdown characteristics of p-NiO/n-Ga_2O_3 with different H_{NiO}.

图 10 及图 11 显示的分别为在相同反向偏压下异质结界面处的二维电场分布和器件内部的电场分布图。由此可见, 在承受反向电压时, 每个 p-NiO/n-Ga_2O_3 异质结均出现一个电场峰值, 特别是在阳极边缘的异质结界面处, 电场强度的提升尤为显著。相对来说, H_{NiO}=1 μm 时器件的每个异质结界面处的电场强度相对而言相差不大, 该处的电场集中效应得到了有效缓解。反观 H_{NiO}= 0.5/1.5 μm 时, 阳极边缘处的异质结界面的电场强度格外高, 表明器件容易在此处发生击穿。因此, H_{NiO}=1 μm 时器件的末尾边缘电场强度大幅减小使得击穿电压达到最高水平。

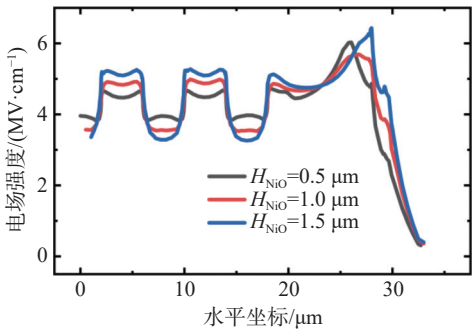

图 10　不同 p-NiO 厚度所对应的复合终端 Ga_2O_3-SBD 在 2 500 V 的反向偏压下沿 p-NiO/n-Ga_2O_3 界面水平方向的电场分布

Fig. 10 Electric field distribution characteristics in the horizontal direction along the interface of p-NiO/n-Ga_2O_3 with different H_{NiO} under reverse bias of 2 500 V.

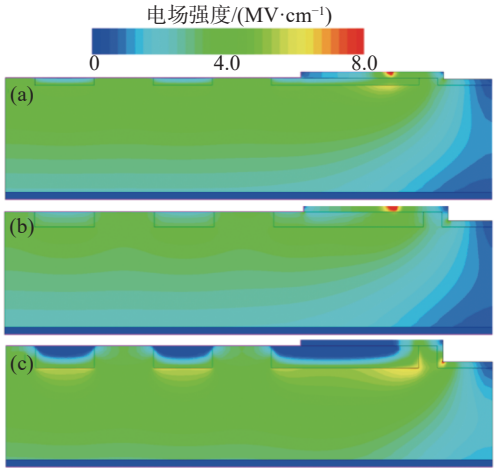

图 11　不同 p-NiO 厚度所对应的复合终端 Ga_2O_3-SBD 在 2 500 V 的反向偏压下的器件内部电场分布。 (a) H_{NiO}=0.5 μm, (b) H_{NiO}=1.0 μm, (c) H_{NiO}=1.5 μm

Fig. 11 Electric field distribution of the SBD with different H_{NiO} under reverse bias of 2 500 V. (a) H_{NiO}=0.5 μm, (b) H_{NiO}=1.0 μm, (c) H_{NiO}=1.5 μm.

另外值得注意的是, 器件 P-FOM 性能随着 p-NiO 厚度的增大而减小, 如图 9(b)所示。故而综合考虑, 取 H_{NiO}= 0.5 μm 为最佳厚度值。

2.5　p-NiO 与阳极交叠长度对复合 SBD 的影响

除此之外, 也通过仿真分析了阳极与尾端 p-NiO 的交叠长度 (图 1(d) 中的参数 *d*) 对器件特性的影响。结果表明, 这一参数对于器件的击穿性能以及导通性能均未产生较大影响。首先, 对于器件的反向击穿性能来说, 在垂直方向上来看, 空间电荷区的分布情况并未因为阳极交叠长度的改变而发生较大改变, 因此无法对器件内部的电场分布产生较大影响。如图 12 所示, 器件的反向击穿电压在不同阳极交叠长度下几乎维持恒定。

而对于器件正向导通性能来说, 器件内部的正向电流主要流经阳极金属与氧化镓形成的肖特基接触处。因此, 阳极交叠区域的改变对器件的正向电流的影响也相对较小。

综上所述, 阳极交叠长度的改变对于该结构的电学性能的影响微乎其微。但从工艺实现的角度来看, 这可以在一定程度上提高器件实现过程中工艺的容错率。

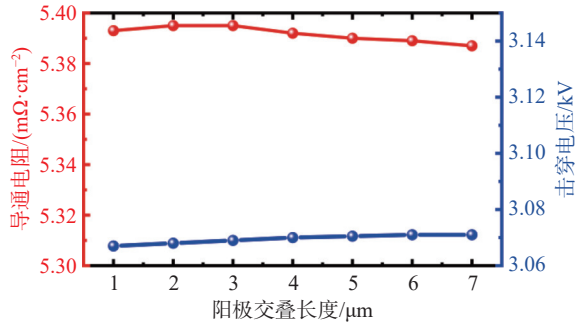

图 12 阳极交叠长度对器件导通电阻(左)以及击穿电压(右)的影响

Fig. 12 The impact of anode overlap length on the device's on-resistance (left) and breakdown voltage (right)

3 结论

本文基于 Sentaurus TCAD 仿真软件，对基础肖特基二极管和复合终端下的异质结肖特基二极管进行了系统的仿真研究，深入探讨了复合终端对肖特基二极管正反向特性的影响。研究表明，通过引入异质结终端、场板终端以及阶梯型终端结构，肖特基二极管的击穿电压由 887 V 显著提升至 3 069 V。进一步的研究发现，在相同反向偏压条件下，复合终端结构有效改善了器件的电场分布和泄露电流特性：(1) 峰值电场由器件表面转移至器件内部，同时数值从 7.578 MV/cm 显著降低至 4.052 MV/cm；(2) PN 结的引入导致了耗尽区的扩展，这能够在一定程度上抑制反向泄露电流；(3) 阶梯型终端同样也可以一定程度上促进耗尽层的扩展，减少耗尽层中的过剩电子，进而减少载流子的碰撞电离效应。

与此同时，本文对 p-NiO 的厚度、掺杂浓度以及阳极交叠长度对器件性能的影响机制进行了详细分析。研究结果表明，当 p-NiO 的掺杂浓度为 4.0×10^{17} cm^{-3} 、厚度为 0.5 μm 时，该复合终端结构的 Ga_2O_3-SBD 达到最优性能。其中阳极交叠长度对器件直流性能影响较小，这可以一定程度提高工艺容错率，对指导器件制备具有较大意义。

基于上述结果，为了进一步优化器件性能，下一步研究将聚焦于 p-NiO 间距等参数对器件特性的具体影响机制。通过更深入的仿真研究，可以为器件设计提供更加精准的理论指导，并进一步提升其实际应用潜能。

参考文献：

[1] J. Li, D. Yang, X. Lu *et al.*, Enhancing Ga_2O_3 Solar-Blind Photodetectors via Metal Nanogratings[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 25(1): 434 - 442.

[2] T. Gake, Y. Kumagai, and F. Oba, First-principles study of self-trapped holes and acceptor impurities in Ga_2O_3 polymorphs[J]. Physical Review Materials, 2019, 3(4): 044603.

[3] J. L. Lyons, A survey of acceptor dopants for β-Ga_2O_3[J]. Semiconductor Science and Technology, 2018, 33(5): 05LT02.

[4] H. Peelaers, J. L. Lyons, J. B. Varley et al., Deep acceptors and their diffusion in Ga_2O_3[J]. APL Materials, 2019, 7(2): 022519.

[5] H. Peelaers and C. G. Van de Walle, Brillouin zone and band structure of β-Ga_2O_3[J]. Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics, 2015, 252(4): 828-832.

[6] J. B. Varley, A. Janotti, C. Franchini *et al.*, Role of self-trapping in luminescence and p-type conductivity of wide-band-gap oxides [J]. Physical Review B, 2012, 85(8): 081109.

[7] X. Xu, Y. Deng, T. Li *et al.*, Ga_2O_3 Vertical FinFET With Integrated Schottky Barrier Diode for Low-loss Conduction [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2024, 71(4): 2530-2535.

[8] N. Allen, M. Xiao, X. D. Yan et al., Vertical Ga_2O_3 Schottky Barrier Diodes With Small-Angle Beveled Field Plates: A Baliga's Figure-of-Merit of 0.6 GW/cm^2[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(9): 1399-1402.

[9] C. Joishi, S. Rafique, Z. B. Xia *et al.*, Low-pressure CVD-grown β-Ga_2O_3 bevel-field-plated Schottky barrier diodes [J]. Applied Physics Express, 2018, 11(3): 031101.

[10] H. Zhou, Q. L. Yan, J. C. Zhang *et al.*, High-performance vertical β-Ga_2O_3 Schottky barrier diode with implanted edge termination [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(11): 1788-1791.

[11] Z. Z. Hu, H. Zhou, Q. Feng *et al.*, Field-plated lateral β-Ga_2O_3 Schottky barrie diode with high reverse blocking voltage of more than 3 kV and high DC power figure-of-merit of 500 MW/cm^2 [J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(10): 1564-1567.

[12] J. C. Yang, F. Ren, M. Tadjer *et al.*, 2300 V reverse breakdown voltage Ga_2O_3 Schottky rectifiers [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2018, 7(5): Q92-Q96.

[13] J. C. Yang, F. Ren, M. Tadjer et al., Ga_2O_3 Schottky rectifiers with 1 ampere forward current, 650 V reverse breakdown and 26.5 MW.cm^{-2} figure-of-merit[J]. AIP Advances, 2018, 8(5): 055026.

[14] H. Y. Wong, TCAD simulation models, parameters, and methodologies for β-Ga_2O_3 power devices[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2023, 12(5): 055002.

[15] X. H. Zhang, F. Liao, X. Huang *et al.*, Design of a 6 kV beta-Ga_2O_3 PN heterojunction diode with etched double-layered NiO with a figure of merit of 10 GW cm^{-2} [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2022, 11(4): 045012.

[16] J. L. Hudgins, G. S. Simin, E. Santi et al., An assessment of wide bandgap semiconductors for power devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 907-914.

[17] L. Meng, D. Yu, H. -L. Huang *et al.*, MOCVD Growth of β-Ga_2O_3 on (001) Ga_2O_3 Substrates [J]. Crystal Growth & Design, 2024, 24(9): 3737-3745.

[18] X. Xu, D. Chen, Y. Lu *et al.*, Nitrogen-doped Ga_2O_3 current blocking layer using MOCVD homoepitaxy for high-voltage and low-leakage Ga_2O_3 vertical device fabrication [J]. Applied Physics Letters, 2024, 125(20): 202107.

[19] H. -C. Huang, Z. Ren, C. Chan *et al.*, Wet etch, dry etch, and MacEtch of β-Ga_2O_3: A review of characteristics and mechanism [J]. Journal of Materials Research, 2021, 36(23): 4756-4770.

[20] H. -K. Lee, H. -J. Yun, K. -H. Shim *et al.*, Improvement of dry etch-induced surface roughness of single crystalline β-Ga_2O_3 using post-wet chemical treatments [J]. Applied Surface Science, 2020, 506(1): 144673.

[21] Y. Wang, H. Gong, X. Jia et al., Demonstration of β-Ga_2O_3 Superjunction-Equivalent MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(4): 2203-2209.

[22] M. Xiao, B. Wang, J. Spencer et al., NiO junction termination extension for high-voltage (>3 kV) Ga_2O_3 devices[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(18): 183501.