编辑推荐·研究论文

h-BN/β-Ga_2O_3 异质结功率二极管的高压终端结构设计与性能优化

曾　佳，许晓锐，朱敏敏，张海忠*

（福州大学 物理与信息工程学院，福州 350108）

摘要：氧化镓（β-Ga_2O_3）作为一种超宽禁带半导体，具有约 4.9 eV 的禁带宽度、8 MV·cm^{-1} 的高临界击穿场强以及优异的巴利加优值，在下一代高压低功耗电力电子领域展现出显著优势。然而，由于 p 型掺杂困难，其器件性能提升受到限制。六方氮化硼（h-BN）作为一种性能优异的超宽禁带（约 6.0 eV）半导体材料，不仅具备极高的击穿电场和热导率，而且相较于 β-Ga_2O_3 更容易实现稳定的 p 型掺杂，为解决传统 β-Ga_2O_3 器件中的 p 型制备难题提供了理想的材料选择。因此，本文以 h-BN/β-Ga_2O_3 异质结二极管（heterojunction diode, HJD）为基础，提出沟槽与场限环复合终端结构，进一步抑制器件边缘电场集中、提升击穿电压，以解决传统 Ga_2O_3 二极管击穿电压（V_B）偏低的问题。与基础 Ga_2O_3 肖特基二极管 416 V 的 V_B 相比，基础 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 结构的 V_B 提升至 524 V，耐压提升了 25.96%。经器件终端结构优化，最终器件的 V_B 提升至 2 480 V，实现了 373.28% 的性能提升。本研究通过 h-BN/β-Ga_2O_3 异质结与高压终端结构设计，解决了 p 型 Ga_2O_3 难以实现以及强电场集中问题，为开发高压 Ga_2O_3 二极管提供了重要的技术参考。

关键词：Ga_2O_3; h-BN; 异质结二极管; 沟槽场限环; TCAD 仿真

中图分类号：TN31　　**文献标志码：**A

DOI: 10.3724/jfmd.2601021　　CSTR: 32180.14.jfmd.2601021

Design and performance optimization of high-voltage termination structure for h-BN/β-Ga_2O_3 heterojunction power diode

ZENG Jia, XU Xiaorui, ZHU Minmin, ZHANG Haizhong*

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Gallium oxide (β-Ga_2O_3), as an ultra-wide bandgap semiconductor with a bandgap of approximately 4.9 eV, exhibits a high critical breakdown electric field of 8 MV·cm^{-1} and an excellent Baliga's figure of merit. These properties render it highly advantageous for next-generation high-voltage and low-power consumption power electronics. However, its device performance is limited by challenges in achieving p-type doping. Hexagonal boron nitride (h-BN), a high-performance ultra-wide bandgap semiconductor material with a bandgap of approximately 6.0 eV, not only demonstrates an exceptionally high breakdown electric field and thermal conductivity but also facilitates more stable p-type doping

收稿日期：2026−01−27;　　**修订日期：**2026−02−27

基金项目：福建省科技重大专项（No. 2024HZ027006）

通信作者：*haizhong_zhang@fzu.edu.cn

compared to β-Ga_2O_3. This characteristic presents an ideal material solution to address the p-type doping challenges inherent in traditional β-Ga_2O_3 devices. Based on the h-BN/β-Ga_2O_3 heterojunction diode (HJD), this paper proposes a composite terminal structure combining trenches and field-limiting rings to further suppress electric field crowding at the device edge and increase the breakdown voltage, so as to address the issue of low breakdown voltage (V_B) in conventional Ga_2O_3 diodes. Compared with a basic Ga_2O_3 Schottky diode with a V_B of 416 V, the proposed h-BN/β-Ga_2O_3 heterojunction diode achieves a V_B of 524 V, representing a 25.96% improvement in voltage resistance. After optimizing the device termination structure, the final breakdown voltage increases to 2480 V, achieving a performance enhancement of 373.28%. This work effectively addresses the challenges of p-type doping in Ga_2O_3 and electric field concentration through the design of the h-BN/β-Ga_2O_3 heterojunction and high-voltage termination structure, offering a significant technical reference for the development of high-voltage Ga_2O_3 diodes.

Key words: Ga_2O_3; h-BN; heterojunction diode; field-limiting ring; TCAD simulation

0 引言

在交通、能源、国防及航天等重大工程领域，高压、大功率的极端工作环境对电子器件的耐受能力与运行稳定性提出了严苛要求[1-2]。功率电子技术作为现代电子系统的核心支撑，在电动汽车、5G 通信、物联网等新兴战略产业的发展进程中扮演着不可或缺的关键角色[3-6]。然而，当前主流的硅基功率器件受限于材料自身仅 1.1 eV 的窄禁带宽度与 0.3 MV·cm^{-1} 的低临界击穿电场，其性能提升已触及物理极限，难以适配下一代高功率、高效率的应用场景[7-8]。在此背景下，超宽禁带半导体材料氧化镓（β-Ga_2O_3）凭借其约 4.9 eV 的超宽禁带宽度、8 MV·cm^{-1} 的高临界击穿场强，以及相较于碳化硅（SiC）[9] 和氮化镓（GaN）[10] 更具优势的巴利加优值（Baliga's figure of merit, BFOM）等突出物理特性[11-14]，被学界与产业界认为是制备下一代高功率密度、低导通损耗功率器件最具潜力的候选材料之一。

与多数宽带隙半导体材料类似，β-Ga_2O_3 面临不对称掺杂难题：n 型掺杂已实现，但 p 型掺杂仍存在技术瓶颈[15]。针对 p 型掺杂问题，通用的解决方案是采用其他 p 型半导体来替代 p 型 Ga_2O_3。近年来，已有研究将其他 p 型氧化物与 n 型 Ga_2O_3 结合，实现了高击穿电压（V_B）的异质结二极管（heterojunction diode, HJD）[16-19]。氧化镍（NiO）作为一种典型的宽带隙 p 型半导体（禁带宽度约为 3.6~4.0 eV），因其空穴浓度可调、制备工艺简单且与 Ga_2O_3 具有较好的带隙匹配而受到广泛关注。研究表明，NiO/Ga_2O_3 HJD 在应用台面终端技术后展现出卓越的功率特性，在反向偏压为−2000 V 时，器件漏电流仅为 4×10^{-7} A·cm^{-2}，最终 V_B 达到 2625 V，功率优值达到 0.99 GW·cm^{-2}[20]。然而，NiO 在实际应用中仍面临一些挑战：一方面，NiO 的空穴迁移率普遍较低，限制了器件的动态响应速度；另一方面，多晶 NiO 与单晶 Ga_2O_3 异质界面处的缺陷态密度较高，容易引发漏电流增加及可靠性问题。此外，NiO 的热导率较低，在高功率运行下难以迅速耗散热量。因此，寻找具有更高热导率、更优界面质量的 p 型材料成为新的研究方向。六方氮化硼（hexagonal boron nitride, h-BN）凭借其优异的导热性能、出色的化学稳定性、高远程光学声子能量以及无悬挂键的平整表面[21-23] 等特性，被认为是下一代理想的电介质材料，可提供高绝缘性以及良好的散热特性，从而降低对半导体器件沟道迁移率的影响。同时，该材料还可用于改善硅（Si）逻辑器件和氮化镓高电子迁移率晶体管（GaN high electron mobility transistor, GaN HEMT）等器件的散热问题[24]。此外，近期研究表明，h-BN 可通过镁（Mg）掺杂实现 p 型导电（激活能 E_a≈30 meV），有望成为 p 型 Ga_2O_3 的优良替代材料[25-28]。

尽管已有研究[29-30] 报道了 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 对 V_B 的提升，但器件性能与理想值仍存在较大差距，且在材料兼容性及器件结构设计等方面面临诸多问题。为突破这一性能瓶颈，本文基于基础 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 结构，设计了沟槽场限环（trench field-limiting ring, T-FLR）终端结构，通过调控器件

内部的电场分布、削弱峰值电场强度实现 V_B 的提升。研究重点分析沟槽尺寸、h-BN 掺杂浓度及场限环数量对器件 V_B 与电场分布的调控规律。仿真结果表明, 相较于基础 Ga_2O_3 肖特基二极管 416 V 的 V_B, 基础 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 的 V_B 提升至 524 V, 耐压性能提升了 25.96%; 经器件终端结构优化后, 最终器件 V_B 进一步攀升至 2480 V, 较基础 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 提升 373.28%。本研究为后续 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 的设计与优化工作提供了理论参考和技术指导。

1　仿真方法

图 1(a)为基础 Ga_2O_3 肖特基二极管结构示意图, 用于验证 h-BN 对 Ga_2O_3 基器件耐压性能的提升作用。图 1(b)~(e)为结合 h-BN 的垂直 Ga_2O_3 二极管的横截面示意图。该器件结构参数如下: Ga_2O_3 衬底厚度为 3 μm、掺杂浓度为 5×10^{19} cm^{-3}; Ga_2O_3 漂移层厚度为 10 μm、掺杂浓度为 1.2×10^{16} cm^{-3}; p 型掺杂 h-BN 层分为高掺杂与低掺杂, 低掺杂层厚度为 300 nm、初始掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3}, 高掺杂层厚度为 100 nm、初始掺杂浓度为 3×10^{19} cm^{-3}; 场限环数量设置为 1~4 个。本研究围绕二极管结构设计与性能优化目标, 系统探究 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 中 h-BN 掺杂浓度及复合终端结构参数(环间距、沟槽宽度及深度等)对器件性能的影响规律。

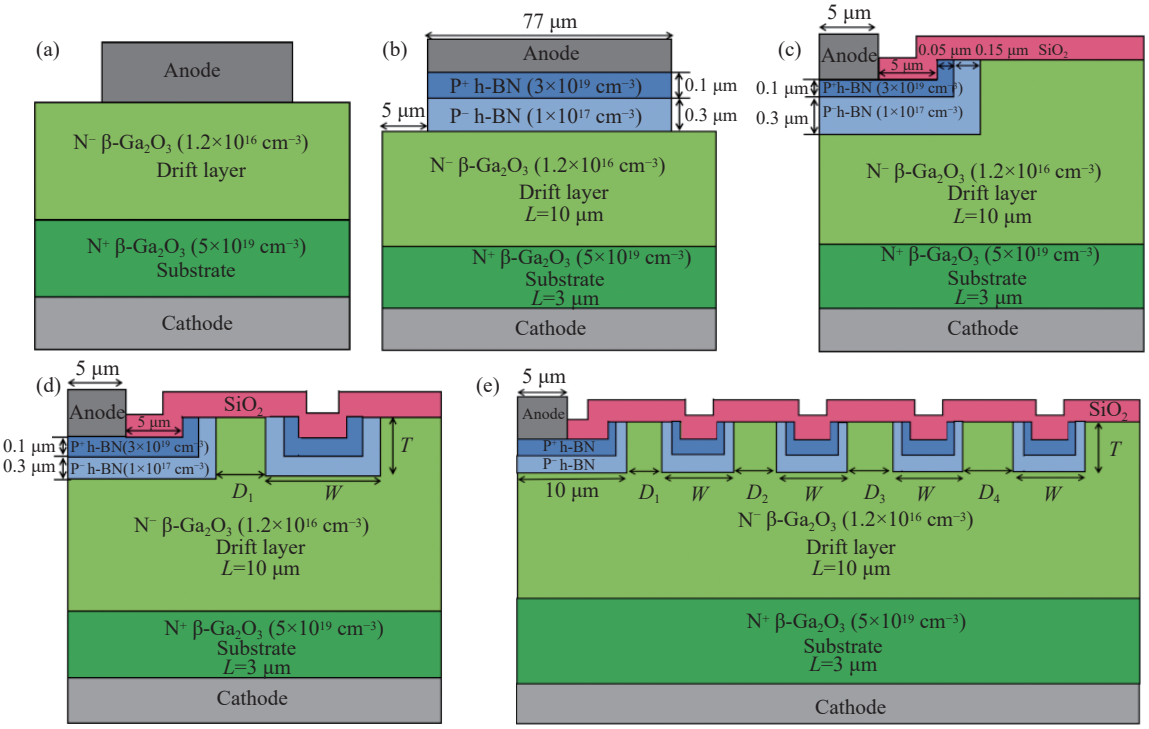


图 1　Ga_2O_3 二极管结构示意图。(a)Ga_2O_3 肖特基二极管; (b)基础 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 结构; (c)h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 场板结构; (d)h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 单场限环结构; (e)h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 四场限环结构

Fig. 1　Schematic diagram of the Ga_2O_3 diode structure. (a) Ga_2O_3 Schottky diode; (b) basic h-BN/β-Ga_2O_3 HJD structure; (c) h-BN/β-Ga_2O_3 HJD with field plate structure; (d) h-BN/β-Ga_2O_3 HJD with single FLR structure; (e) h-BN/β-Ga_2O_3 HJD with four FLR structure

在 Ga_2O_3 HJD 的设计与优化过程中, 传统实验方法存在研发周期长、制造成本高、结构迭代效率低等固有局限, 难以适配高性能 Ga_2O_3 HJD 新结构快速开发的需求。Synopsys 公司开发的 Sentaurus TCAD(technology computer aided design)仿真平台, 不仅能够精准模拟器件尺寸参数变化对电学性能的影响规律, 还可直观呈现不同器件结构的内部工作机制, 进而有效指导器件新结构的设计与优化。因此, 将 Sentaurus TCAD 仿真平台作为辅助工具, 可显著提升研究效率。表 1 列出了仿真中定义的 β-Ga_2O_3 部分关键参数。需注意的是, Ga_2O_3 研究目前仍处于发展阶段, 相关物理模型及参数设置尚不

表 1　仿真中定义的 β –Ga_2O_3 部分参数

Table 1　Partial parameters of β-Ga_2O_3 defined in simulation

β-Ga_2O_3参数	取值
禁带宽度E_g/eV	4.9
电子迁移率μ/($cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$)	150
电子亲和能χ/eV	4.0
导带有效态密度N_C/cm^{-3}	3.71×10^{18}

表 2　仿真中定义的 h–BN 部分参数

Table 2　Partial parameters of h-BN defined in the simulation

h-BN参数	取值
禁带宽度E_g/eV	6.0
电子亲和能χ/eV	2.13
价带有效态密度N_V/cm^{-3}	3×10^{19}
相对介电常数ε_r	3.9
临界击穿场强E_C/(MV·cm^{-1})	10

完善，因此本文进一步介绍仿真过程中所采用的几种核心物理模型。

在半导体器件仿真中，能带结构是最基础的核心属性。半导体材料的本征载流子浓度与禁带宽度及能带边缘状态密度密切相关。本仿真选用适用范围最广的“OldSlotboom”模型作为能带模型。此外，带隙中深缺陷能级上的复合通常被称为 Shockley-Read-Hall（SRH）复合，这是半导体物理中描述电子与空穴通过材料内部缺陷发生间接复合的经典理论。在 Sentaurus TCAD 仿真中，其复合率（R_{net}^{SRH}）通过式（1）计算。

$$R_{net}^{SRH}=\frac{np-n_{i,eff}^2}{\tau_p(n+n_1)+\tau_n(p+p_1)} \tag{1}$$

式中：n、p 和 $n_{i,eff}$ 分别为电子浓度、空穴浓度以及有效本征载流子浓度；τ_n、τ_p 分别为电子寿命和空穴寿命；n_1、p_1 分别对应费米能级与禁带复合能级重合时的平衡电子浓度和平衡空穴浓度，其具体表达式如式（2）~（3）所示。

$$n_1=n_{i,eff}\exp\left(\frac{E_{trap}}{kT}\right) \tag{2}$$

$$p_1=n_{i,eff}\exp\left(\frac{-E_{trap}}{kT}\right) \tag{3}$$

式（2）~（3）中，E_{trap} 为缺陷能级与本征能级之间的差值，k 为玻尔兹曼常数，T 为温度。在仿真过程中，SRH 复合被设置为“SRH (Doping Dependence)”模式，以考虑掺杂浓度对 SRH 复合过程的影响。需要特别说明的是，由于 Sentaurus TCAD 材料库中未包含 h-BN 的相关参数，因此在上述物理模型的基础上，进一步补充了 h-BN 的部分关键参数，具体如表 2 所示[31-33]。

2　结果与讨论

为验证 h-BN 对 Ga_2O_3 基器件耐压性能的提升作用，开展相关仿真研究。图 1（a）展示了 Ga_2O_3 肖特基二极管的横截面示意图，采用简易元胞模型计算 V_B。其中，Ga_2O_3 衬底掺杂浓度设定为 5×10^{19} cm^{-3}，Ga_2O_3 漂移层 n 型掺杂浓度为 1.2×10^{16} cm^{-3}。在此参数下，通过仿真得到该肖特基二极管的 V_B 为 416 V，其耐压受限的核心原因在于：肖特基接触的势垒高度较低，且 Ga_2O_3 自身缺乏稳定的 p 型层调控能带结构，导致主结边缘电场集中效应显著，载流子易通过热发射或隧穿机制越过势垒，引发提前击穿。

为解决这一问题，在仿真中引入 p 型 h-BN 替代原始肖特基接触的阳极侧结构，构建 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 模型。仿真结果显示，器件 V_B 提升至 524 V，相较于原始 Ga_2O_3 肖特基二极管实现了约 25.96% 的耐压提升。p-BN 与 n-Ga_2O_3 形成 Ⅱ 型异质结，其价带偏移量（ΔE_V≈1.75 eV）与导带偏移量（ΔE_C≈3.35~3.65 eV）[34] 共同构建起更陡峭、更稳定的电子阻挡势垒。相较于肖特基接触的势垒，异质结势垒能更有效地抑制电子注入与漏电流，提高器件击穿临界电压。同时，h-BN 易于实现稳定的高浓度 p 型掺杂，能够避免 Ga_2O_3 p 型掺杂中存在的自补偿效应，从而促进耗尽区均匀扩展。然而，通过 h-BN 替换实现的 25.96% 耐压提升仍较为有限，未达到高压电力电子应用的理想需求，仍需对器件结构参数进行设计优化。

2.1　h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 场板结构

如图 2（a）所示，h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 基础结构因采用对称设计，在 h-BN 与 Ga_2O_3 异质界面处形成两个对称击穿点。为简化分析，本研究在该基础上按图 1（c）进行不对称处理，并保持核心结构参数统一（Ga_2O_3 漂移层掺杂浓度为 1.2×10^{16} cm^{-3}、厚度为 10 μm；h-BN 高掺杂层掺杂浓度为 P^+ h-BN

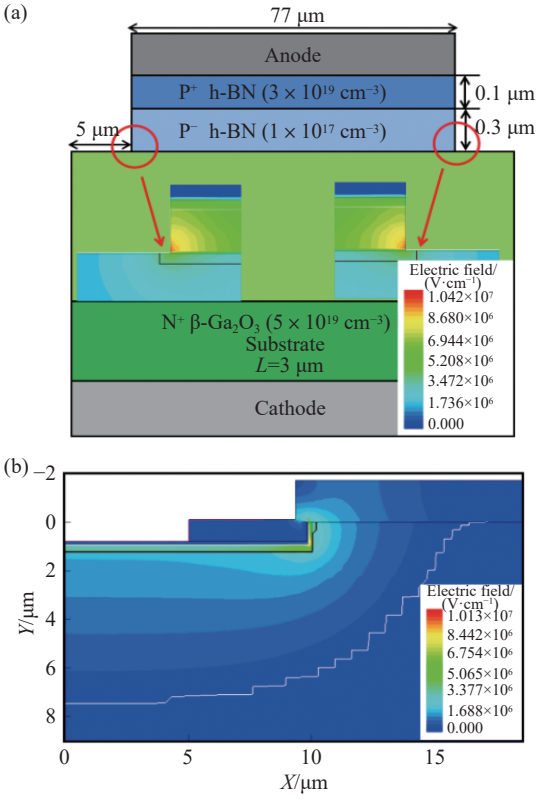


图 2　h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 的电场分布。(a)基础结构击穿时的电场分布; (b)场板结构的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution of h-BN/β-Ga_2O_3 HJD. (a) Breakdown field distribution of the basic structure; (b) field distribution of the field plate structure

3×10^{19} cm^{-3}、低掺杂层掺杂浓度为 P^- h-BN 1×10^{17} cm^{-3})。引入固定结构的 SiO_2 介质场板, 旨在精准解析其电场调控效果, 为后续参数优化及复合终端结构设计提供靶向依据。仿真结果显示, 该场板结构的 V_B 为 545.8 V, 相较于 Ga_2O_3 材料8 MV·cm^{-1} 理论临界击穿场强对应的理想耐压潜力, 未实现显著提升。结合图 2(b)的电场分布可知, 产生这一结果的核心原因在于场板调控局限与异质结特性的耦合作用: 电场仍集中于 h-BN/β-Ga_2O_3 异质结界面及场板边缘区域, 未能形成全域均匀分布; 常规场板的调控效果高度依赖结构参数与异质结特性的精准匹配, 当前固定参数的场板未能充分适配 h-BN 与 Ga_2O_3 的能带对齐特性, 无法有效引导耗尽区向漂移层纵深扩展, 导致 Ga_2O_3 的高耐压潜力未被充分释放。该分析为后续针对性优化场限环复合终端结构、突破器件耐压瓶颈提供了重要理论依据。

2.2　h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 沟槽场限环结构

场限环的核心调控思路是通过引入辅助结实现电场的分段分散, 其数量直接决定了电场的细分次数, 是影响电场分布均匀性与器件耐压潜力释放的关键参数。为精准解析场限环数量对器件 V_B 及电场分布的调控机制, 本节采用控制变量法设计仿真方案: 固定初始沟槽尺寸(宽度 W=10 μm、深度 T=1.2 μm)、h-BN 掺杂浓度(P^+ h-BN 3×10^{19} cm^{-3}、P^- h-BN 1×10^{17} cm^{-3}), 以及初始环间距梯度分布(D_1=2.5 μm、D_2=2.8 μm、D_3=3.2 μm、D_4=3.6 μm), 仅改变场限环的数量(N=1~4), 系统探究其对器件性能的影响规律。

从图 3 的仿真结果可以看出, 当 N=1 时, 器件 V_B 从基础结构的 524 V 跃升至 860.5 V, 相对提升幅度达 64.22%。这一显著提升的物理机制在于: 场限环将原本集中于阳极边缘的单一高电场峰分解为两段平缓电场, 有效削弱了局部电场强度; 同时, 场限环引导耗尽区向 Ga_2O_3 漂移层纵向扩展, 使漂移层的耐压空间得到充分利用。然而, 随着场限环数量进一步增加(N=2、3、4), 对应 V_B 分别为 895.7 V、877.5 V、874.3 V, 无显著提升。当 N=4 时, 第四个场限环未参与电场调控, 主要原因是耗尽区未覆盖至该区域, 无法实现电场分担。此外, h-BN 掺杂浓度与多场限环结构的适配性不足, 导致各结的电场峰值存在明显差异, 高电场峰值结成为耐压瓶颈。固定环间距未考虑电场天然衰减特性, 远离阳极的场限环对电场的分散作用被削弱, 限制了 V_B 的持续提升。因此, 需先优化 h-BN 掺杂浓度, 使各场限环的电场调控能力趋于均衡, 再进一步调整环间距。

h-BN 作为 p 型层与 Ga_2O_3 形成异质结, 其双层掺杂结构分工明确: 高掺杂层 P^+ h-BN 为阳极提供低阻欧姆接触, 保障载流子高效输运; 低掺杂层 P^- h-BN 直接与 Ga_2O_3 漂移层接触, 是耗尽区形成与扩展的核心区域。P^- h-BN 的掺杂浓度不仅直接决定异质结的能带偏移量、耗尽区的扩展范围与分布形态, 以及载流子的输运效率, 更是均衡多场限环结构下各结电场峰值的关键参数。采用控制变量法设计仿真方案: 固定场限环数量(N= 4)、P^+ h-BN 掺杂浓度(3×10^{19} cm^{-3})、沟槽尺寸(W=10 μm、T=1.2 μm)及初始环间距(D_1=2.5 μm、D_2=2.8 μm、

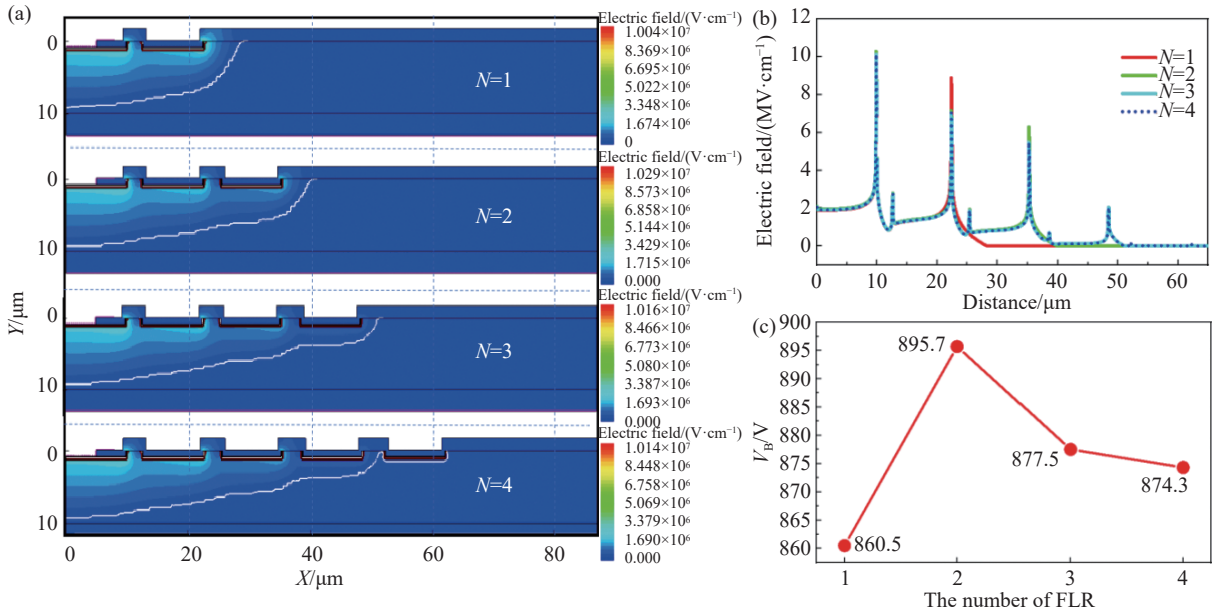


图 3　不同场限环数量 N 下的电场分布与击穿电压。(a)电场分布;(b)击穿时表面电场分布;(c)击穿电压

Fig. 3 Electric field distribution and breakdown voltage under different field-limiting ring numbers N. (a) Electric field distribution; (b) surface electric field distribution at breakdown; (c) breakdown voltage

D_3=3.2 μm、D_4=3.6 μm)，仅对 P^- h-BN 的掺杂浓度进行梯度优化，范围设定为 1×10^{17} cm^{-3}~5×10^{18} cm^{-3}。图 4(a)所示为 V_B随 P^- h-BN 掺杂浓度的变化曲线，可以看出器件 V_B 随 P^- h-BN 掺杂浓度的变化呈先快速上升，达到峰值后显著下降，最后在高掺杂浓度区趋于平稳的特征：在低掺杂浓度区(< 1×10^{18} cm^{-3})，V_B 从 874.3 V 快速攀升至峰值(2045 V)，原因在于该区间内 P^- h-BN 载流子浓度不足、导电性较弱，异质结耗尽区主要局限于 h-BN 层内部，无法与 Ga_2O_3 漂移层形成有效耦合，电场集中于主结区域；而随着掺杂浓度逐步升高，h-BN 与 Ga_2O_3 的能带偏移量逐渐适配，耗尽区开始在两层材料中均匀扩展，既向 h-BN 层适度渗透，又充分延伸至 Ga_2O_3 漂移层纵深，主结与各辅助结的电场被有效分散，峰值趋于均衡，进而推动 V_B 快速上升。当掺杂浓度超过 1×10^{18} cm^{-3} 进入过掺杂区后，V_B 从峰值快速下降至约 1650 V，核心原因是过高的载流子浓度压缩了耗尽区的纵向扩展空间，使其难以向 Ga_2O_3 漂移层纵深延伸，转而集中在异质结界面附近，主结与辅助结的电场重新集中，器件耐压瓶颈再次出现。当掺杂浓度进一步升至 3×10^{18} cm^{-3} 以上的高掺杂饱和区时，V_B 基本稳定在 1650 V 左右，这是由于此时 P^- h-BN 已接近高掺杂水平，耗尽区被完全限制在 h-BN 层界面附近的极薄区域，其形态与电场分布不再随掺杂浓度升高发生显著变化，电场集中程度趋于稳定，因此 V_B 不再大幅波动。从图 4(b)电场分布形态来看，在 1×10^{18} cm^{-3} 掺杂浓度下，形成了更大范围的均匀耗尽区；而在 1×10^{17} cm^{-3} 掺杂浓度下，耗尽线仅延伸至第三个场限环附近。对应图 4(c)的表面电场曲线，在掺杂浓度为 1×10^{18} cm^{-3} 时，曲线在第四个场限环位置呈现明显的电场峰，且该峰值与前 3 个环的电场峰强度相近，符合多场限环均匀分担电压的最优工作状态；而在掺杂浓度为 1×10^{17} cm^{-3} 时，第四个场限环对应的电场峰几乎消失，说明其未参与电场调控。因此，通过对 h-BN 低掺杂层的掺杂浓度调控，得到最优 h-BN 低掺杂层的掺杂浓度为 1×10^{18} cm^{-3}。

针对固定等间距场限环结构中各结电场峰值分布不均及远端场限环失效的问题，本研究提出一种逐环偏移、靶向优化的参数调控策略。该策略以拉平各结击穿时刻的表面电场峰值为核心目标，遵循单一变量、迭代优化的原则，依次对环间距参数进行分步调控。首先，固定 D_2=2.8 μm、D_3=3.2 μm、D_4=3.6 μm，仅调整阳极与首个场限环的间距 D_1(图 5(a))；在确定最优 D_1=2.3 μm 后，固定该参数并调整 D_2(图 5(b))；以此类推，完成 D_3(图 5(c))

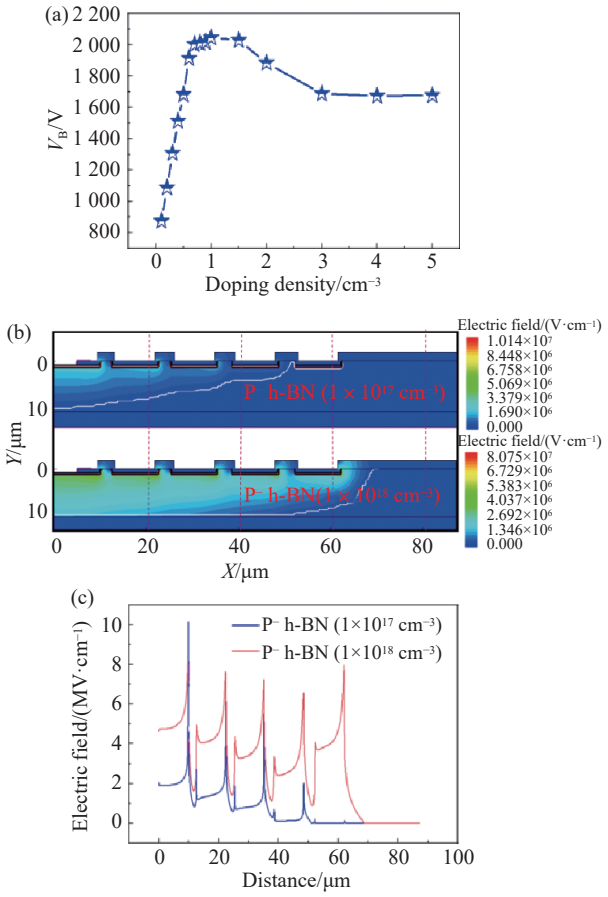


图 4　不同 P^- h-BN 掺杂浓度下的击穿电压与电场分布。(a)击穿电压; (b)电场分布; (c)击穿时表面电场分布

Fig. 4 Breakdown voltage and electric field distribution for h-BN with different P^- doping densities. (a) Breakdown voltage; (b) Electric field distribution; (c) Surface electric field distribution at breakdown

与 D_4(图 5(d))的靶向优化, 最终得到非等间距最优组合: D_1=2.3 μm、D_2=2.5 μm、D_3=3.1 μm、D_4=3.6 μm。经仿真验证, 该非等间距设计使器件击穿电压从等间距结构的 2045 V 提升至 2153 V, 性能提升约 5.28%, 其核心作用机制在于, 梯度化的环间距设计能够匹配主结与各场限环的电场强度差异, 使各环的耗尽区实现无缝衔接。 相较于等间距结构中远端环电场强度不足导致的耗尽区覆盖不充分问题, 非等间距设计使每个场限环均成为有效的电场分担单元, 大幅削弱了主结与场限环边缘的电场集中效应。

在完成场限环参数优化的基础上, 本研究进一步对沟槽结构的关键尺寸(深度 T、宽度 W)展开优化。沟槽作为 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 的核心物理载体, 其尺寸直接决定了器件纵向与横向的耗尽区扩展能力: T 主导耗尽区的纵向扩展空间, W 则同时影响异质结的接触质量与横向耗尽区覆盖范围。如图 5(e)所示, 当 T 从 0.8 μm 增加至 1.4 μm 时, 器件 V_B 呈现先升后降的变化趋势, 在 T=1.0 μm 时达到峰值 2280 V。这是由于 T 过小时, 纵向耗尽区扩展受限, 电场易集中于沟槽底部; 而 T 尺寸过大则导致电场畸变效应加剧, 从而降低器件耐压性能。随后, 对 W 进行调控(图 5(f)), 当 W 从 8 μm 增加至 15 μm 时, V_B 同样呈现先升后降的规律, 在 W=12 μm 时达到全局最优值 2480 V。这一现象的本质在于, 适度增大 W 可拓宽横向耗尽区的覆盖范围, 降低表面电场集中; 但当 W 超过 12 μm 后, 沟槽边缘的电场畸变效应加剧, 同时异质结接触电阻增大, 导致器件耐压性能下降。

3　结论

本研究提出一种 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD, 充分利用 h-BN 材料的超宽带隙、高击穿电场、高热导率及 p 型特性, 有效解决了传统 Ga_2O_3 肖特基二极管击穿电压(V_B)较低的问题。通过 TCAD Sentaurus 对不同结构器件的电学特性进行对比研究, 重点围绕 h-BN 掺杂浓度、沟槽与场限环复合终端结构展开优化。

研究结果表明, 无场终端结构的传统 Ga_2O_3 肖特基二极管 V_B 仅为 416 V。引入 p-BN 材料后, 无场终端结构的 h-BN/β-Ga_2O_3 HJD 的 V_B 提升了 25.96%, 达到 524 V。在此基础上, 进一步引入沟槽与场限环复合终端结构, 并通过多参数协同优化, 发现较低的 h-BN 掺杂浓度对器件 V_B 起关键调控作用。当掺杂浓度为 1×10^{18} cm^{-3} 时, 可实现各场限环电场峰值的均匀分担, 从而使 V_B 在该阶段达到最大值。此外, 采用非等间距设计的场限环能够有效解决远端环耗尽区覆盖不足的问题; 沟槽尺寸需精准匹配, 当深度 T=1.0 μm、宽度 W=12 μm 时, 可充分释放器件纵向与横向的耐压潜力, 避免电场集中与界面缺陷引发的性能衰减。最终, 优化后的器件 V_B 提升了 373.28%, 达到 2480 V。

本研究为高压 Ga_2O_3 功率器件的设计提供了重要的技术参考, 对推动 Ga_2O_3 功率器件在高压电力电子领域的应用具有重要意义。

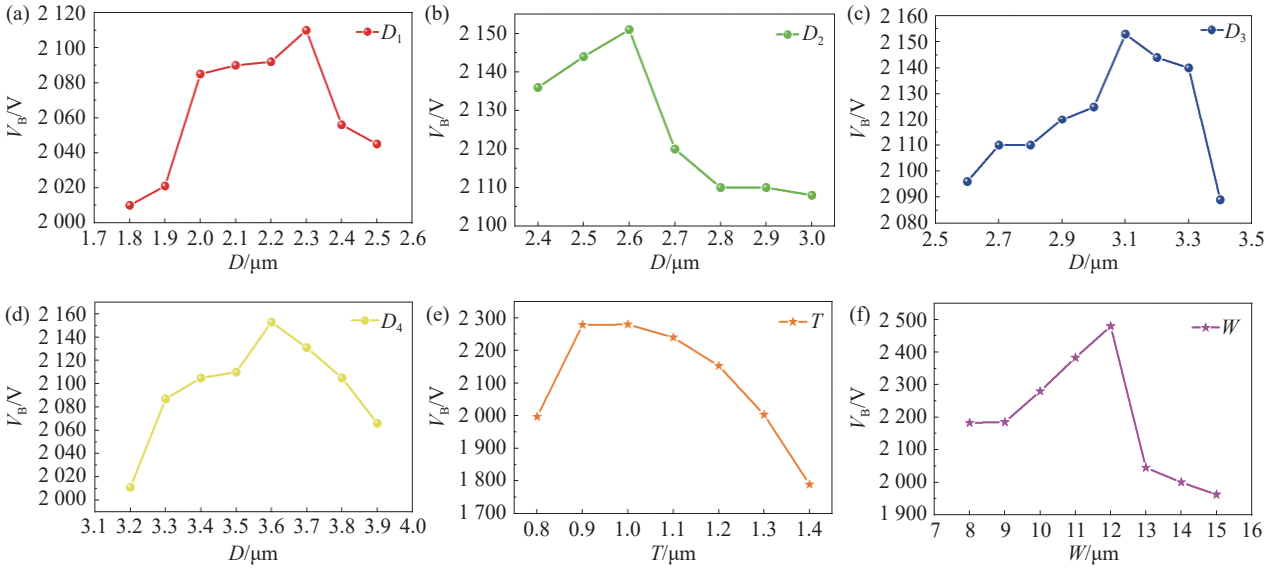


图 5　不同结构参数对击穿电压的影响。(a)当 D_2=2.8 μm、D_3=3.2 μm、D_4=3.6 μm 时，不同环间距 D_1 对应的击穿电压；(b)当 D_1=2.3 μm 时，不同环间距 D_2 对应的击穿电压；(c)当 D_1=2.3 μm、D_2=2.5 μm 时，不同环间距 D_3 对应的击穿电压；(d)当 D_1=2.3 μm、D_2=2.5 μm、D_3=3.1 μm 时，不同环间距 D_4 对应的击穿电压；(e)确定环间距后，不同沟槽深度 T 对应的击穿电压；(f)确定环间距及 T 后，不同沟槽宽度 W 对应的击穿电压

Fig. 5　Effect of different structural parameters on breakdown voltage. (a) Breakdown voltage corresponding to different ring spacings D_1 when D_2=2.8 μm, D_3=3.2 μm, and D_4=3.6 μm; (b) breakdown voltage corresponding to different ring spacings D_2 when D_1=2.3 μm; (c) breakdown voltage corresponding to different ring spacings D_3 when D_1=2.3 μm and D_2=2.5 μm; (d) breakdown voltage corresponding to different ring spacings D_4 when D_1=2.3 μm, D_2=2.5 μm, and D_3=3.1 μm; (e) breakdown voltage corresponding to different trench depths T after determining ring spacings; (f) breakdown voltage corresponding to different trench widths W after determining ring spacings and T

参考文献：

[1] Ji Xueqiang, Lu Chao, Yan Zuyong, et al. A review of gallium oxide-based power Schottky barrier diodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(44): 443002.

[2] Kimoto T. Material science and device physics in SiC technology for high-voltage power devices[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(4): 040103.

[3] Perreault D J, Hu Jingying, Rivas J M, et al. Opportunities and challenges in very high frequency power conversion[C]//2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. New York: IEEE, 2009: 1-14.

[4] Filchev T, Carastro F, Wheeler P, et al. High voltage high frequency power transformer for pulsed power application[C]//The 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010. New York: IEEE, 2010: T6-165-T6-170.

[5] Mao Saijun, Wu Tao, Lu Xi, et al. High frequency high voltage power conversion with silicon carbide power semiconductor devices[C]//2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference. New York: IEEE, 2016: 1-5.

[6] Dong Dong, Lin Xiang, Ravi L, et al. Advancement of SiC high-frequency power conversion systems for medium-voltage high-power applications[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York: IEEE, 2020: 717-724.

[7] Zhang Lei, Yuan Xibo, Wu Xiaojie, et al. Performance evaluation of high-power SiC MOSFET modules in comparison to Si IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1181-1196.

[8] Rujas A, López V M, Garcia-Bediaga A, et al. Railway traction DC-DC converter: comparison of Si, SiC-hybrid, and full SiC versions with 1 700 V power modules[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(12): 3265-3271.

[9] She Xu, Huang A Q, Lucía Ó, et al. Review of silicon carbide power devices and their applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8193-8205.

[10] Oka T. Recent development of vertical GaN power devices[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58: SB0805.

[11] Pearton S J, Yang Jiancheng, Cary P H, et al. A review of

Ga_2O_3 materials, processing, and devices[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5: 011301.

[12] Green A J, Speck J, Xing G, et al. β-Gallium oxide power electronics[J]. APL Materials, 2022, 10(2): 029201.

[13] Higashiwaki M, Sasaki K, Murakami H, et al. Recent progress in Ga_2O_3 power devices[J]. Semiconductor Science and Technology, 2016, 31(3): 034001.

[14] Ren Fan, Yang J C, Fares C, et al. Device processing and junction formation needs for ultra-high power Ga_2O_3 electronics[J]. MRS Communications, 2019, 9(1): 77-87.

[15] Huang C Y, Tsai X Y, Tarntair F G, et al. Heteroepitaxially grown homojunction gallium oxide PN diodes using ion implantation technologies[J]. Materials Today Advances, 2024, 22: 100499.

[16] Lu Xing, Zhou Xianda, Jiang Huaxing, et al. 1-kV sputtered p-NiO/n-Ga_2O_3 heterojunction diodes with an ultra-low leakage current below 1 μA/cm^2[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, 41(3): 449-452.

[17] Gong H H, Chen X H, Xu Y, et al. A 1.86-kV double-layered NiO/β-Ga_2O_3 vertical p-n heterojunction diode[J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(2): 022104.

[18] Kokubun Y, Kubo S, Nakagomi S. All-oxide p-n heterojunction diodes comprising p-type NiO and n-type β-Ga_2O_3[J]. Applied Physics Express, 2016, 9(9): 091101.

[19] Watahiki T, Yuda Y, Furukawa A, et al. Heterojunction p-Cu_2O/n-Ga_2O_3 diode with high breakdown voltage[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(22): 222104.

[20] 文俊棚, 郝伟兵, 韩照, 等. 氧化镍/氧化镓异质结二极管台面终端技术研究 [J]. 人工晶体学报, 2025, 54(3): 517-523.
Wen Junpeng, Hao Weibing, Han Zhao, et al. Mesa termination technology for NiO/β-Ga_2O_3 heterojunction diode[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2025, 54(3): 517-523.

[21] Amalia W, Nurwantoro P, Sholihun. Density-functional-theory calculations of structural and electronic properties of vacancies in monolayer hexagonal boron nitride (h-BN)[J]. Computational Condensed Matter, 2019, 18: e00354.

[22] Günder D, Watanabe K, Taniguchi T, et al. Van der Waals bound organic/2D insulator hybrid structures: epitaxial growth of acene films on *h*BN(001) and the influence of surface defects[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(34): 38757-38767.

[23] Li Lin, Zhang Ye, Zhang Ruijie, et al. A minireview on chemical vapor deposition growth of wafer-scale monolayer *h*-BN single crystals[J]. Nanoscale, 2021, 13(41): 17310-17317.

[24] Mao Jingyu, Wu Shuang, Ding Guanglong, et al. A van der Waals integrated damage-free memristor based on layered 2D hexagonal boron nitride[J]. Small, 2022, 18(12): 2106253.

[25] Khalil L, Ernandes C, Avila J, et al. High p doped and robust band structure in Mg-doped hexagonal boron nitride[J]. Nanoscale Advances, 2023, 5(12): 3225-3232.

[26] Mballo A, Srivastava A, Sundaram S, et al. Towards P-type conduction in hexagonal boron nitride: doping study and electrical measurements analysis of hBN/AlGaN heterojunctions[J]. Nanomaterials, 2021, 11(1): 211.

[27] Sun Feipeng, Hao Zhuoran, Liu Guozhen, et al. P-Type conductivity of hexagonal boron nitride as a dielectrically tunable monolayer: modulation doping with magnesium[J]. Nanoscale, 2018, 10(9): 4361-4369.

[28] Wang Yuejin, Liu Guozhen, Lu Shiqiang, et al. Enhancement of p-type conductivity of monolayer hexagonal boron nitride by driving Mg incorporation through low-energy path with N-rich condition[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(21): 212101.

[29] Marye S A, Tsai X Y, Kumar R R, et al. A hBN/Ga_2O_3 pn junction diode[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 23484.

[30] Xu Mingfei, Biswas A, Li Tao, et al. Vertical β-Ga_2O_3 metal-insulator-semiconductor diodes with an ultrathin boron nitride interlayer[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(23): 232107.

[31] Pierret A, Mele D, Graef H, et al. Dielectric permittivity, conductivity and breakdown field of hexagonal boron nitride[J]. Materials Research Express, 2022, 9(6): 065901.

[32] Laturia A, Van de Put M L, Vandenberghe W G. Dielectric properties of hexagonal boron nitride and transition metal dichalcogenides: from monolayer to bulk[J]. npj 2D Materials and Applications, 2018, 2: 6.

[33] Roy S, Zhang Xiang, Puthirath A B, et al. Structure, properties and applications of two-dimensional hexagonal boron nitride[J]. Advanced Materials, 2021, 33(44): 2101589.

[34] Li Kuanghui, Torres-Castanedo C G, Sundaram S, et al. Conduction and valence band offsets of Ga_2O_3/*h*-BN heterojunction[PP/OL]. arXiv (2019-06-17) [2026-01-05]. https://arxiv.org/abs/1906.06891.