

h-BN/ β -Ga₂O₃ 异质结功率二极管高压终端结构与性能优化

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 -Ga₂O₃)作为一种超宽禁带半导体, 具有约 4.9 eV 的超宽禁带、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半导体材料(约 6.0 eV), 不仅具备极高的击穿电场和热导率, 而且相较于 β -Ga₂O₃ 更容易实现稳定的 p 型掺杂, 为解决传统 β -Ga₂O₃ 器件中 p 型制备难题提供了理想的材料选择。因此, 本文创新性地提出 h-BN/ β -Ga₂O₃ 异质结二极管, 以解决传统 Ga₂O₃ 二极管耐压(breakdown voltage, V_B)低的问题。在此基础上, 通过 TCAD 仿真设计沟槽与场限环复合终端结构, 进一步提升器件的耐压水平。与基础 Ga₂O₃ 肖特基二极管 416 V 的 V_B 相比, 基础 h-BN/ β -Ga₂O₃ 异质结二极管结构的 V_B 提升至 524 V, 耐压提升 25.7%。经过器件终端结构设计优化, 最终器件 V_B 提升至 2480 V, 实现了 473.28% 的性能提升。本研究通过 h-BN/ β -Ga₂O₃ 异质结与高压终端结构设计, 解决了 p 型 Ga₂O₃ 难以实现以及强电场集中问题, 为开发高压 Ga₂O₃ 二极管提供了重要的技术参考。

关键词: Ga₂O₃; 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 -Ga₂O₃ 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 -Ga₂O₃), 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

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)

作者简介: 曾 佳(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型半导体电子器件(E-mail: 231127009@fzu.edu.cn)

通信作者: 张海忠(1983—), 男, 教授, 研究方向为新型半导体电子器件(E-mail: haizhong_zhang@fzu.edu.cn)

high breakdown electric field and thermal conductivity but also facilitates more stable p-type doping compared to $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. This characteristic presents an ideal material solution to address the p-type doping challenges inherent in traditional $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ devices. In this study, an innovative h-BN/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction diode is proposed to overcome the low V_B limitation of conventional Ga_2O_3 diodes. Furthermore, a composite termination structure incorporating trenches and field-limiting rings is designed through TCAD simulation to enhance the device's breakdown voltage. Compared to a basic Ga_2O_3 Schottky diode with a V_B of 416 V, the proposed h-BN/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction diode achieves a V_B of 524 V, representing a 25.7% improvement in voltage resistance. After optimizing the device termination structure, the final breakdown voltage increases to 2480 V, achieving a performance enhancement of 473.28%. 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/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction and high-voltage termination structure, offering a significant technical reference for the advancement of high-voltage Ga_2O_3 diodes.

Key words: Ga_2O_3 ; h-BN; heterojunction diode; groove 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 $0.3 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 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($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) 凭借其约 4.9 eV 的超宽禁带宽度、 $8 \text{ MV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 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], 被学界与产业界普遍认为是制备下一代高功率密度、低导通损耗功率器件的最具潜力的候选材料之一。

与多数宽带隙半导体材料类似, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 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, 实现高击穿电压(V_B)的异质结二极管(HJD)^[16-19]。氧化镍(NiO)作为一种典型的宽带隙p型半导体(带隙约为 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 异质结二极管在应用台面终端技术后展现出卓越的功率特性, 在 -2000 V 下器件漏电流仅为 $4\times 10^{-7} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 最终 V_B 达到 2625 V, 功率优值达到 $0.99 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ^[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型材料成为了新的研究方向。六方氮化硼(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]等材料特性, 不仅被认为是下一代理想的电介质材料, 可提供高绝缘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, 还适用于硅(Si)逻辑器件和氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)等容易受焦耳热效应困扰的器件^[24]。近期研究表明, h-BN 可通过镁(Mg)掺杂实现p型导电(激活能 $E_a\approx 30 \text{ meV}$), 有望成为p型 Ga_2O_3 的优良替代材料^[25-28]。

尽管已有研究报道 h-BN/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ HJD 可实现 V_B 的提升^[29-30], 但此类器件性能仍与理想值存在较大差距, 且面临材料兼容性及器件结构设计等问题。为突破这一性能瓶颈, 本文在基础 h-BN/ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ HJD 结构的基础上, 设计沟槽场限环(field-limiting ring, FLR)终端结构, 通过调控器件内部电场分布、削弱峰值电场强度, 实现击穿电压的提升。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 Ga₂O₃ 肖特基二极管 416 V 的耐压, 基础 h-BN/ β -Ga₂O₃ 异质结二极管的 V_B 提升至 524 V, 耐压性能提升 25.7%; 通过器件终端结构设计优化后, 最终器件 V_B 进一步攀升至 2480 V, 性能提升幅度达 473.28%。本研究期望为后续 h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 的设计与优化工作提供理论参考和技术指导。

1 仿真方法

图 1(a) 为基础 Ga₂O₃ 肖特基二极管结构示意图

图, 用于验证 BN 对 Ga₂O₃ 基器件耐压性能的提升作用。图 1(b)~(e) 为结合 h-BN 的垂直 Ga₂O₃ 二极管的横截面示意图。该器件结构参数如下: Ga₂O₃ 衬底厚度 3 μm 、掺杂浓度 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; Ga₂O₃ 漂移层厚度 10 μm 、掺杂浓度 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; p 型掺杂 h-BN 层分为高掺杂与低掺杂两层, 其中低掺杂层厚度 300 nm、初始掺杂浓度 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 高掺杂层厚度 100 nm、初始掺杂浓度 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 场限环数量为 1~4 个。本研究围绕二极管结构与性能优化目标, 系统探究 h-BN/Ga₂O₃ HJD 中 h-BN 掺杂浓度、场限环宽度及结深等关键参数对器件性能的影响。

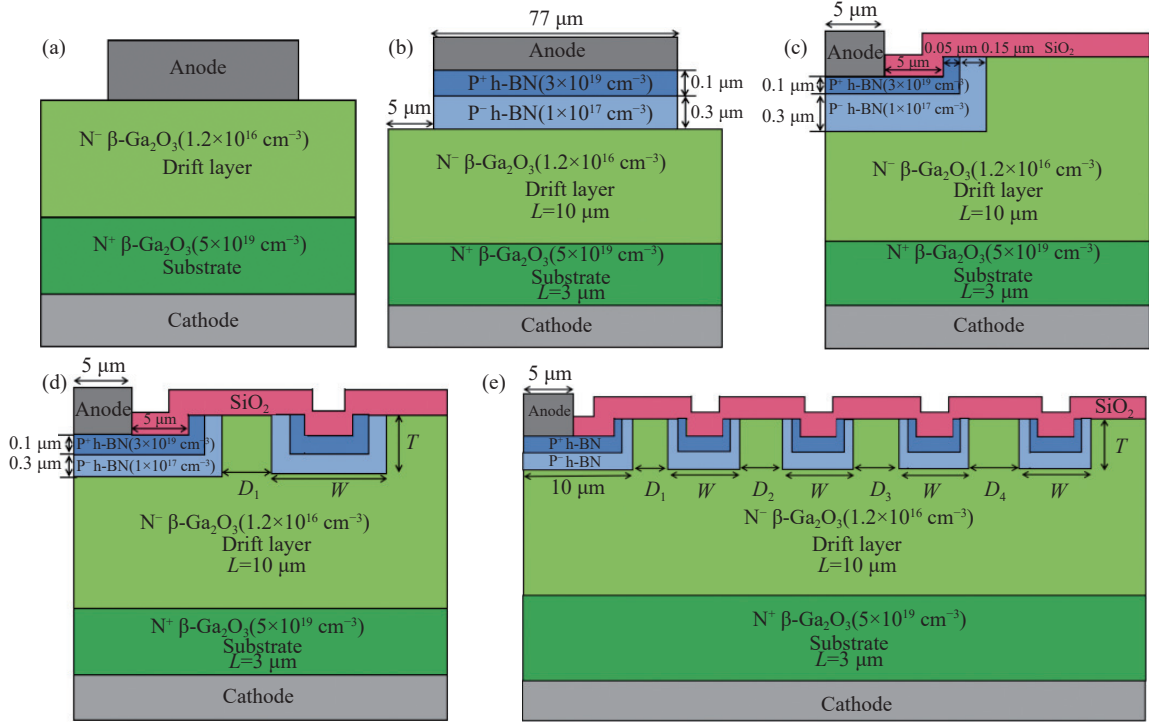


图 1 Ga₂O₃ 二极管结构示意图。(a) Ga₂O₃ 肖特基二极管; (b) 基础 h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 结构; (c) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 场板结构; (d) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 1 场限环结构; (e) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 4 场限环结构

Fig. 1 Schematic diagram of the Ga₂O₃ diode structure. (a) Ga₂O₃ schottky diode; (b) basic h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD structure; (c) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD with field plate structure; (d) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD with 1 FLR structure; (e) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD with 4 FLR structure

在 Ga₂O₃ 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 Ga₂O₃ HJD 新结构快速开发的需求。Synopsys 公司开发的 Sentaurus TCAD(technology computer aided design, TCAD) 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, 可显著提升传统实验的研究效率。表 1 列出了仿真中定义的 β -Ga₂O₃ 部分关键参数, 需要注意的是, Ga₂O₃ 研究目前仍处于发展阶段, 相关物理模型及参数设置尚未完善。因此本文将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。

表 1 仿真中定义的 β -Ga₂O₃ 部分参数

Table 1 Partial parameters of β -Ga₂O₃ defined in simulation

材料参数	β -Ga ₂ O ₃
禁带宽度 E_g /eV	4.9
电子迁移率 μ /(cm ² ·Vs ⁻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}

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 ($R_{\text{net}}^{\text{SRH}}$) 由式(1)给出:

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

式中, n 、 p 和 $n_{i,\text{eff}}$ 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:

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

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

式中, E_{trap} 为缺陷能级与本征能级之间的差值。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 BN 对 Ga₂O₃ 基器件耐压性能的提升作用,本文开展了相关仿真研究,具体仿真条件与结果如下:图 1(a)展示了 Ga₂O₃ 肖特基二极管的横截面示意图,仿真采用简易元胞模型计算 V_B 。其中 Ga₂O₃ 衬底掺杂浓度设定为 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, Ga₂O₃ 漂移层 n 型掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在此参数下,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 Ga₂O₃ 自身缺乏稳定的 p 型层调控能带结构,导

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

材料参数	h-BN
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_C /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

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,仿真中引入 p 型 BN 替代原始肖特基接触的阳极侧结构,构建 BN/Ga₂O₃ 异质结二极管模型。仿真结果显示,器件 V_B 提升至 524 V,相较于原始 Ga₂O₃ 肖特基二极管实现了约 25.7% 的耐压提升。p-BN 与 n-Ga₂O₃ 形成 II 型异质结,其价带偏移量 ($\Delta E_v \approx 1.75 \text{ eV}$) 与导带偏移量 ($\Delta E_c \approx 3.35 \sim 3.65 \text{ eV}$)^[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 Schottky 势垒,异质结势垒能更有效抑制电子注入与漏电流,延长器件击穿临界电压。同时,BN 易实现稳定高浓度 p 型掺杂的特性,避免了 Ga₂O₃ p 型掺杂的自补偿效应,促进耗尽区均匀扩展。然而,通过 BN 替换实现的 25.7% 耐压提升仍有限,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 -Ga₂O₃ HJD 场板结构

如图 2(a) 所示, BN/Ga₂O₃ HJD 基础结构因采用对称设计,在 BN 与 Ga₂O₃ 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 (Ga₂O₃ 漂移层掺杂浓度 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度 10 μm ; BN 高掺杂层掺杂浓度 P+ BN $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、低掺杂层掺杂浓度 P-BN $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)。引入固定结构的 SiO₂ 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 Ga₂O₃ 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) 的电场分布图可知,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

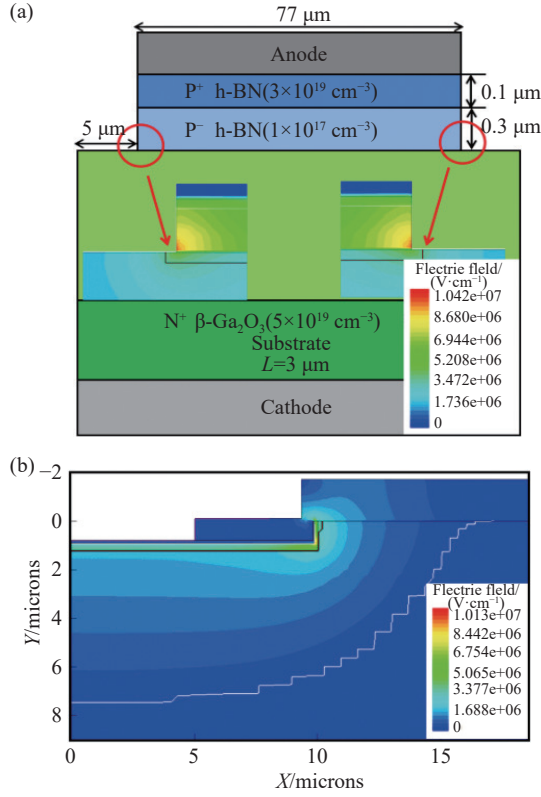


图 2 (a) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 基础结构的电场击穿分布图; (b) h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD 场板结构电场分布图

Fig. 2 (a) Electric field breakdown of the basic h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD structure; (b) electric field distribution diagram of the h-BN/ β -Ga₂O₃ HJD with field plate structure

于 BN/Ga₂O₃ 异质结界面及场板边缘区域, 未能形成全域均匀分布; 且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 BN 与 Ga₂O₃ 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 Ga₂O₃ 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 -Ga₂O₃ 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。为了精准解析场限环数量对器件击穿电压(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 $W=10\ \mu\text{m}$ 、深度 $T=1.2\ \mu\text{m}$)、BN 掺杂浓度(P+ BN $3\times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 、P- BN $1\times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$), 同时固定初始环间距梯度分布($D_1=2.5\ \mu\text{m}$ 、 $D_2=2.8\ \mu\text{m}$ 、 $D_3=3.2\ \mu\text{m}$ 、 $D_4=3.6\ \mu\text{m}$), 仅改变场限环的数量 $N=1\sim 4$, 系统探究其对器件性能的影响规律。

从仿真结果(图 3)可见, 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 64.2%。这一显著提升的物理机制在于: 场限环将

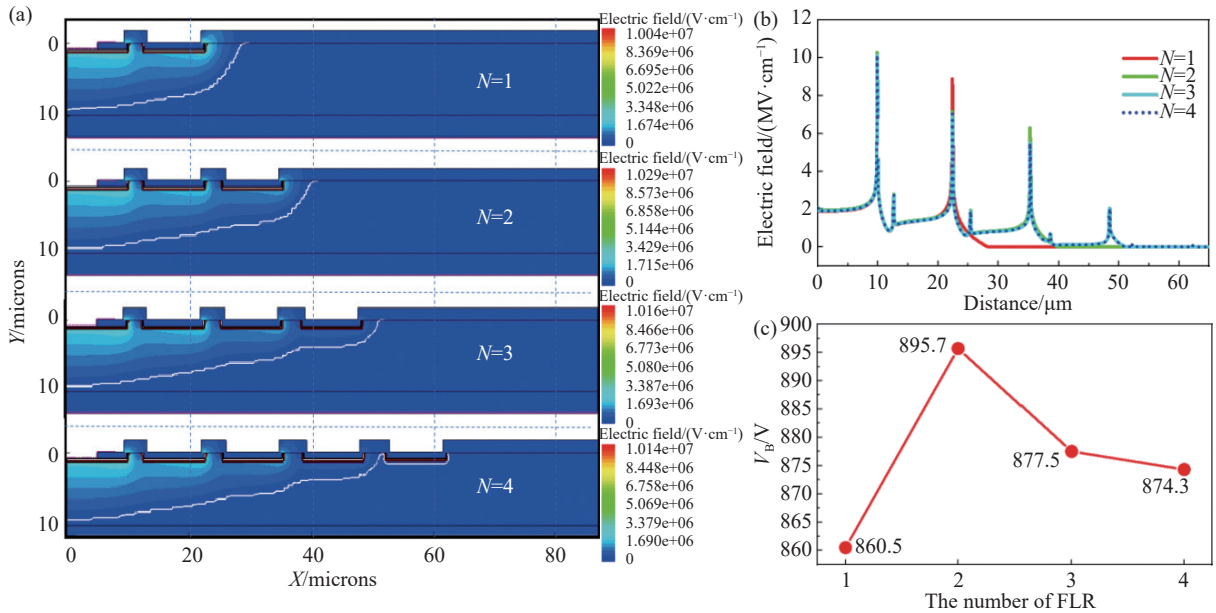


图 3 不同数量 $N(1\sim 4)$ 场限环 (a) 电场分布; (b) 击穿时表面电场分布图; (c) 击穿电压

Fig. 3 Electric field analysis for different numbers of field limiting rings ($N=1\sim 4$): (a) electric field distribution; (b) surface electric field distribution at breakdown; (c) breakdown voltage

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($N=2, 3, 4$), V_B 分别为 895.7 V、877.5 V、874.3 V,提升幅度并未显著变化。当场限环数量 $N=4$ 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,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 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。

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+ 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- 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- BN 的掺杂浓度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+ BN 浓度($3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、沟槽尺寸(宽度 $W=10 \mu\text{m}$ 、深度 $T=1.2 \mu\text{m}$)及初始环间距($D_1=2.5 \mu\text{m}$ 、 $D_2=2.8 \mu\text{m}$ 、 $D_3=3.2 \mu\text{m}$ 、 $D_4=3.6 \mu\text{m}$),仅对 P- BN 的掺杂浓度进行梯度优化,浓度范围设定为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。如图 4(a) 所示为 V_B 随 P- BN 掺杂浓度的变化曲线,从图中可观察到器件 V_B 随 P- BN 掺杂浓度的变化呈现先快速上升、达峰后显著下降、高浓度区趋于平稳的特征:在低浓度区($< 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)时, V_B 从 874.3 V 快速攀升至峰值(2045 V),这是由于该区间内 P- BN 载流子浓度不足,导电性较弱,异质结耗尽区主要局限于 BN 层内部,无法与 Ga_2O_3 漂移层形成有效耦合,导致电场集中于主结区域;而随着浓度逐步升高,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 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。当浓度超过 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 进入过浓区后, V_B 从峰值

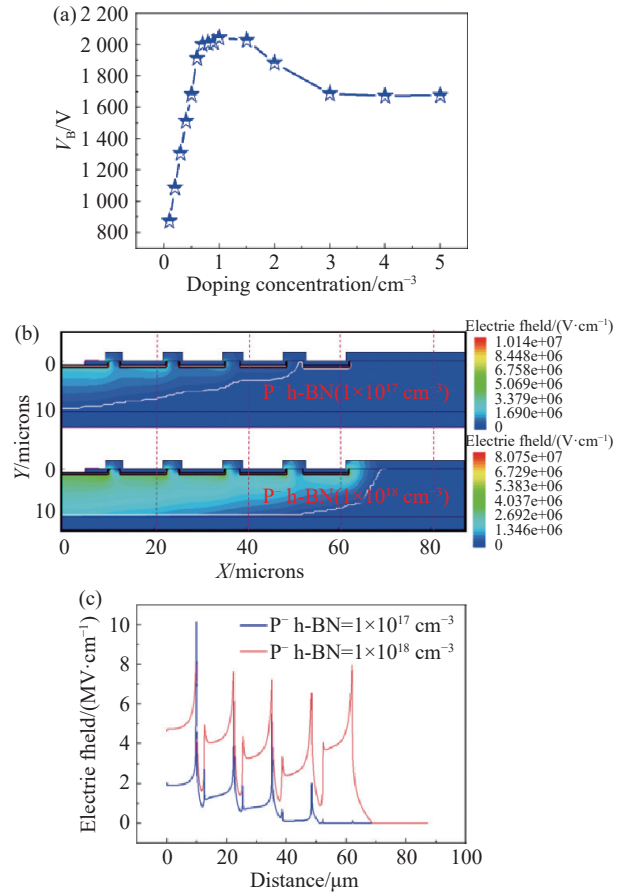


图 4 不同 P- h-BN 掺杂浓度。(a) 击穿电压; (b) 电场分布; (c) 击穿时表面电场分布

Fig. 4 Different p-type h-BN doping concentrations. (a) Breakdown voltage; (b) electric field distribution; (c) surface electric field distribution diagram at breakdown

快速降至约 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。当浓度进一步升至 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上的高浓饱和区时, V_B 基本稳定在 1650 V 左右,这是由于此时 P- BN 已接近高掺杂水平,耗尽区被完全限制在 BN 层界面附近的极薄区域,其形态与电场分布不再随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 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 浓度下,形成了更大范围的均匀耗尽区;而在 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 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 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时,曲线在第四个场限环位置呈现明显的电场峰,且该峰值与前三个环的

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 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 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BN低掺杂层的掺杂浓度调控,得到最优BN低掺杂层掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

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,本研究提出了一种逐个拉偏、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 $D_2=2.8 \mu\text{m}$ 、 $D_3=3.2 \mu\text{m}$ 、 $D_4=3.6 \mu\text{m}$,仅调整阳极与首个场限环的间距 D_1 (对应图5(a));在确定最优 $D_1=2.3 \mu\text{m}$ 后,固定该参数并调整 D_2 (对应图5(b));以此类推,依次先后完成 D_3 (对应图5(c))与 D_4 (对应图5(d))的靶向优化,最终得到非等间距最优组合: $D_1=2.3 \mu\text{m}$ 、 $D_2=2.5 \mu\text{m}$ 、 $D_3=3.1 \mu\text{m}$ 、 $D_4=3.6 \mu\text{m}$ 。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5.3%。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耦合。相较于等间距结构中远端环因电场强度不足导致的耗尽区覆盖不充分问题,非等间距设计让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。由于沟槽作为BN/Ga₂O₃ 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,当沟槽深度 T 从 $0.8 \mu\text{m}$ 增至 $1.4 \mu\text{m}$ 时,器件击穿电压呈现先升后降的变化趋势,在 $T=1.0 \mu\text{m}$ 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。随后对沟槽宽度 W 进行调控(对应图5(f)),当 W 从 $8 \mu\text{m}$ 增至 $15 \mu\text{m}$ 时,击穿电压同样呈现先升后降的规律,在 $W=12 \mu\text{m}$ 时达到全局最优值2480 V。这一现象的本质在于,适度增大

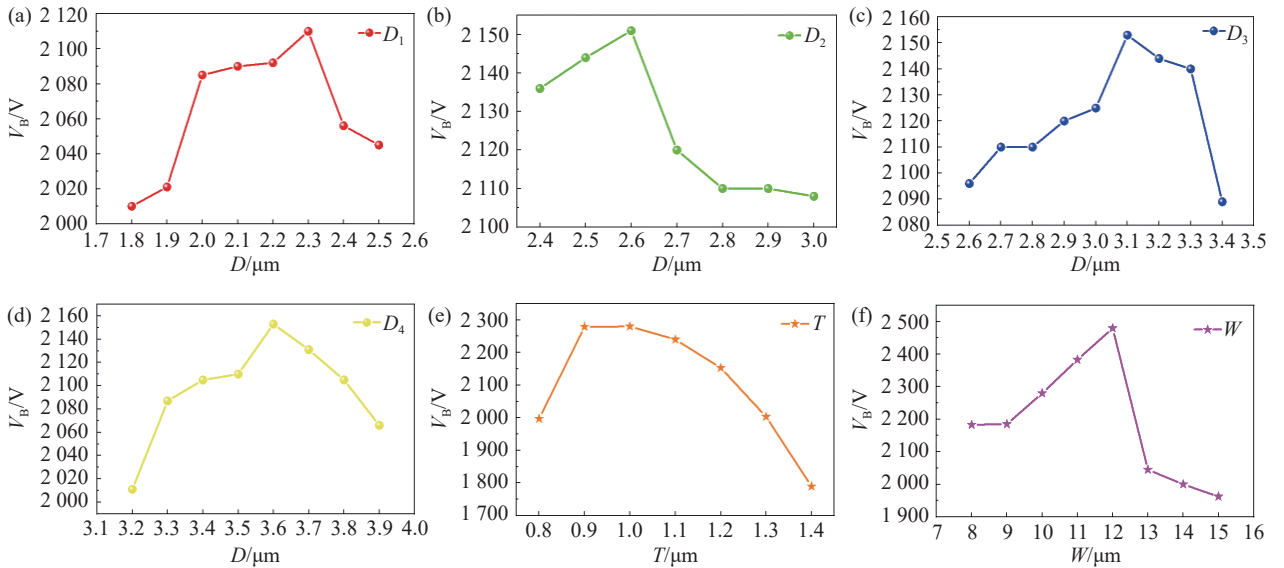


图5 (a)当 $D_2=2.8 \mu\text{m}$ 、 $D_3=3.2 \mu\text{m}$ 、 $D_4=3.6 \mu\text{m}$ 时,不同环间距 D_1 对应的击穿电压;(b)当 $D_1=2.3 \mu\text{m}$ 时,不同环间距 D_2 对应的击穿电压;(c)当 $D_1=2.3 \mu\text{m}$ 、 $D_2=2.5 \mu\text{m}$ 时,不同环间距 D_3 对应的击穿电压;(d)当 $D_1=2.3 \mu\text{m}$ 、 $D_2=2.5 \mu\text{m}$ 、 $D_3=3.1 \mu\text{m}$ 时,不同环间距 D_4 对应的击穿电压;(e)确定环间距后,不同沟槽尺寸 T 对应的击穿电压;(f)确定环间距以及 T 后,不同沟槽尺寸 W 对应的击穿电压

Fig. 5 (a) Breakdown voltage with varying ring spacings D_1 at $D_2=2.8 \mu\text{m}$, $D_3=3.2 \mu\text{m}$, and $D_4=3.6 \mu\text{m}$; (b) breakdown voltage with varying ring spacings D_2 at a fixed $D_1=2.3 \mu\text{m}$; (c) breakdown voltage with varying ring spacings D_3 at fixed $D_1=2.3 \mu\text{m}$ and $D_2=2.5 \mu\text{m}$; (d) breakdown voltage with varying ring spacings D_4 at fixed $D_1=2.3 \mu\text{m}$, $D_2=2.5 \mu\text{m}$, and $D_3=3.1 \mu\text{m}$; (e) breakdown voltage with varying groove dimensions T after determining ring spacings; (f) breakdown voltage with varying groove dimensions W after determining ring spacings and T

W 可拓宽横向耗尽区的覆盖范围,降低表面电场集中;但 W 超过 $12\text{ }\mu\text{m}$ 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

本研究提出了一种p-BN/n-Ga₂O₃异质结二极管,充分利用了h-BN材料的超宽带隙、高的击穿电场、良好的热导率以及p型特性,有效解决了传统Ga₂O₃肖特基二极管耐压(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了对比研究,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。研究表明,无场终端结构的传统Ga₂O₃肖特基二极管耐压仅为416 V。引入p-BN材料后,无场终端结构的BN/Ga₂O₃异质结二极管(HJD)耐压提升了25.7%,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BN掺杂浓度对器件耐压起关键调控作用。当掺杂浓度为 $1\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 时,可实现各场限环电场峰值的均匀分担,从而最大化耐压(V_B)。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 $T=1.0\text{ }\mu\text{m}$ 、宽度 $W=12\text{ }\mu\text{m}$ 时,可充分释放器件纵向与横向的耐压潜力,避免因电场集中与界面缺陷引发的性能衰减。最终,优化后的器件耐压提升了473.28%,达到2480 V。本研究为高压Ga₂O₃功率器件的设计提供了重要的技术参考,对推动Ga₂O₃功率器件在高压电力电子领域的应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] JI X, LU C, YAN Z, 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 J, Rivas J M, et al. Opportunities and challenges in very high frequency power conversion[C]//Proceedings of the 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]//Proceedings of the 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010. New York: IEEE, 2010: T6-165-T6-170.
- [5] Mao S, Wu T, Lu X, et al. High frequency high voltage power conversion with silicon carbide power semiconductor devices[C]//Proceedings of the 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference. New York: IEEE, 2016: 1-5.
- [6] Dong D, Lin X, Ravi L, et al. Advancement of SiC high-frequency power conversion systems for medium-voltage high-power applications[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference. New York: IEEE, 2020: 717-724.
- [7] ZHANG L, YUAN X, WU X, 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 1700 V power modules[J]. *IET Power Electronics*, 2019, 12(12): 3265-3271.
- [9] SHE X, 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 J, CARY P H IV, et al. A review of Ga₂O₃ 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 Ga₂O₃ power devices[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2016, 31(3): 034001.
- [14] REN F, YANG J C, FARES C, et al. Device processing and junction formation needs for ultra-high power Ga₂O₃ 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 X, ZHOU X, JIANG H, et al. 1-kV sputtered p-NiO/n-Ga₂O₃ heterojunction diodes with an ultra-low leakage current below 1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ [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 -Ga₂O₃ 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 -Ga₂O₃[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(9): 091101.
- [19] WATAHIKI T, YUDA Y, FURUKAWA A, et al. Heterojunction p-Cu₂O/n-Ga₂O₃ diode with high breakdown voltage[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(22): 222104.
- [20] WEN J P, HAO W B, HAN Z, et al. Mesa termination technology for NiO/ β -Ga₂O₃ 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 hBN(001) and the influence of surface defects[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(34): 38757-38767.
- [23] LI L, ZHANG Y, ZHANG R, 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 J Y, WU S, DING G, 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/AlGa₂N heterojunctions[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(1): 211.
- [27] SUN F, HAO Z, LIU G, 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 Y, LIU G, LU S, 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/Ga₂O₃ pn junction diode[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 23484.
- [30] LI X, LI Y C, YANG Y, et al. Highly stable electronics based on β -Ga₂O₃ for advanced memory applications[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(12): 2413846.
- [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 X, PUTHIRATH A B, et al. Structure, properties and applications of two-dimensional hexagonal boron nitride[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(44): e2101589.
- [34] Li K H, Torres-Castaneda C G, Sundaram S, et al. Conduction and valence band offsets of Ga₂O₃/h-BN heterojunction [J]. *Applied Physics*, 2019.