

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.02.008

沟槽结构 β -Ga₂O₃ SBD 的设计与仿真

杨震, 吴春艳, 吴霞, 高金绪龙, 陈强, 解光军

(合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:在肖特基势垒二极管(Schottky barrier diode, SBD)漂移层表面刻蚀沟槽形成金属-绝缘体-半导体(metal-insulator-semiconductor, MIS)结构,抑制镜像力效应并减小器件的反向漏电流,是提升器件反向击穿特性的有效途径。为优化沟槽结构 β -Ga₂O₃ SBD 的结构参数,文章利用 Silvaco Atlas 软件仿真不同台面宽度和沟槽深度对器件性能的影响。结果表明,参数优化后(台面宽度 1.0 μ m,沟槽深度 0.5 μ m)的沟槽结构 β -Ga₂O₃ SBD 开启电压为 0.6 V、比导通电阻为 1.69 m Ω ·cm²、击穿电压为 1 416 V、功率品质因数为 1.19 GW/cm²,实现了兼具低开启电压和高击穿电压的良好器件性能。与基础结构 SBD 和场板结构 SBD 相比,优化后的器件性能得到显著提升。

关键词: β -Ga₂O₃;肖特基势垒二极管(SBD);沟槽结构;功率器件仿真

中图分类号:TN313.4

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)02-0196-08

Design and simulation of trenched β -Ga₂O₃ Schottky barrier diode

YANG Zhen, WU Chunyan, WU Xia, GAO Jinxulong, CHEN Qiang, XIE Guangjun

(School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract:The metal-insulator-semiconductor(MIS) structure formed by trenching the drift layer of Schottky barrier diode(SBD) can restrict the image force and reduce the reverse leakage current, which has proved to be effective in improving the reverse breakdown characteristics of the device. To optimize the structure parameters of trenched β -Ga₂O₃ SBD, the effect of mesa width and trench depth on the device performance was researched by simulation using Silvaco Atlas. Results revealed that the trenched β -Ga₂O₃ SBD with the mesa width of 1.0 μ m and trench depth of 0.5 μ m presented the turn-on voltage of 0.6 V, specific on-resistance of 1.69 m Ω ·cm², breakdown voltage of 1 416 V and power figure of merit of 1.19 GW/cm², showing merits of both low turn-on voltage and high breakdown voltage. The device performance was remarkably improved when compared to that of the regular SBD and field-plated SBD.

Key words: β -Ga₂O₃; Schottky barrier diode(SBD); trenched structure; power device simulation

β -Ga₂O₃ 是一类新兴的宽禁带半导体材料,由于具有比传统宽禁带半导体材料(如 GaN、SiC)更宽的带隙(4.8 eV)、更高的临界击穿场强(8 MV/cm)、较高的电子迁移率(250 cm²/(V·s)和电子饱和速率(2×10⁷ cm/s),有望以更低的成

本制造系统更薄、功率更高且损耗更低的功率器件,近年来在功率电子器件领域备受关注^[1]。结构简单的 β -Ga₂O₃ 基肖特基势垒二极管(Schottky barrier diode, SBD)因开启电压低、开关速度快等优点,在高频、高速的电力电子器件领域有举

收稿日期:2023-03-16;修回日期:2023-05-11

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085MF177)

作者简介:杨震(1997—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

吴春艳(1978—),女,安徽石台人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师;

陈强(1962—),男,江苏无锡人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

解光军(1970—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: gjxie8005@hfut.edu.cn.

足轻重的地位^[2-3]。文献[4]首次报道基于 $1.4\ \mu\text{m}$ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 同质外延层肖特基二极管,器件击穿电压达 $100\ \text{V}$,比导通电阻为 $2\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$;文献[5]使用 $10\ \mu\text{m}$ 漂移层制备了阳极直径 $105\sim 210\ \mu\text{m}$ 的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,器件击穿电压最高达 $1\ 016\ \text{V}$,比导通电阻为 $6\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。然而,传统基础结构的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 由于电场集中效应和镜像力的作用,器件容易在边缘处被提前击穿^[6]。采用场板终端^[7]、保护环终端^[8-9]、离子注入技术^[10]扩展金属阳极下的耗尽区,使得耗尽区边界的曲率半径增加,降低肖特基接触边缘的电场密度,可以显著提高器件的击穿电压。文献[11]构造首个场板结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,器件击穿电压高达 $1\ 076\ \text{V}$,导通电阻为 $5.1\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$;文献[12]的仿真结果表明,通过优化设计浮动金属场环, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的击穿电压提升可达 54% 。然而平面结终端技术虽然可以提高器件的击穿电压,但是不能减小漏电流水平,若漏电流产生的功耗占主导,则会使器件温度升高产生一个正反馈机制,可能导致热奔(thermal runaway),引起肖特基整流器工作不稳定^[13]。

在二极管漂移层表面刻蚀沟槽,形成金属-绝缘体-半导体(metal-insulator-semiconductor, MIS)结构,可以使电场强度峰值从肖特基接触边缘转移至器件体内,同时可以抑制镜像力效应,防止势垒降低,减小器件的反向漏电流,避免器件过早击穿^[14-15]。文献[16]首次制备了具有沟槽终端结构的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,与传统结构器件相比,由于电流路径的减小,沟槽结构器件的比导通电阻略有增大,但器件的漏电流降低了几个数量级;文献[17]基于 $10\ \mu\text{m}$ 外延层构建了台面宽度占比 $(60\pm 5)\%$ 、沟槽深度 $2\ \mu\text{m}$ 的沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,相较于传统结构器件,耐压特性有了显著的提升,击穿电压由 $734\ \text{V}$ 增加到 $1\ 232\ \text{V}$,而器件漏电流为 $0.1\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。实验结果表明,优化沟槽结构参数(如沟槽深度、台面宽度等)能够进一步提升器件性能^[18-20]。然而关于沟槽的台面宽度和深度对器件影响的报道还很少。

本文利用 Silvaco TCAD 软件设计沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,调控台面宽度和沟槽深度,探讨沟槽结构参数对器件性能的影响,设计高击穿电压($>1\ 200\ \text{V}$)、低比导通电阻($<2\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)的器件。

1 仿真参数与模型

本文基于日本 Novel Crystal Technology

(NCT)公司购买的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 外延基片开展仿真工作,基片参数为 Sn 掺杂浓度 $3\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ 的衬底上外延 $8\ \mu\text{m}$ 、Si 掺杂浓度 $2\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 的外延层。为构建 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,器件底部为欧姆接触,顶部采用功函数为 $5.12\ \text{eV}$ 的阳极金属,形成肖特基接触。

仿真所用 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 参数^[21]见表 1 所列。

表 1 仿真所用 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的参数

参数	数值
禁带宽度/eV	4.80
电子亲和势/eV	4.33
相对介电常数	10
导带态密度/ $(10^{18}\ \text{cm}^{-3})$	3.72
价带态密度/ $(10^{19}\ \text{cm}^{-3})$	1.16
低电场电子迁移率/ $[\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})]$	118
低电场空穴迁移率/ $[\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})]$	50

基础物理模型采用平行电场依赖迁移率模型(fldmob model)、Shockley-Read-Hall 复合模型(SRH model)、俄歇复合模型(Auger model)、能带变窄模型(bgn model)和费米狄拉克统计模型(Fermidirac model)^[22-23]。仿真反向击穿特性时,还需加入碰撞离化模型 Selberherr impact ionization^[24]来模拟雪崩击穿。碰撞离化参数设置为: $A_N=2.50\times 10^8\ \text{cm}^{-1}$, $B_N=2.26\times 10^7\ \text{V}\cdot\text{cm}$, $A_P=2.23\times 10^8\ \text{cm}^{-1}$, $B_P=2.70\times 10^8\ \text{V}\cdot\text{cm}$ 。同时,考虑到镜像力效应^[25]引起的势垒降低对器件击穿特性的影响,仿真时加入镜像力模型(在 contact 语句添加 barrier,指定 surf. rec、nsurf. rec 并设置参数 $\alpha=0$ 、 $\beta=1$ 、 $\gamma=1$)。仿真过程中使用 Newton 迭代法进行数值计算,当反向电流突然增加或反向电流达到 $1\ \text{A}/\text{cm}^2$ 时,判断器件击穿^[26]。为了验证材料参数和仿真模型的合理性,本文仿真了文献[17]中基于 NCT 公司外延基片的基础结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,器件结构及仿真结果如图 1 所示。

由图 1b 和图 1c 可知,仿真得到的器件正向比导通电阻 $R_{\text{on}}=6.28\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$,反向击穿电压 $V_B=742\ \text{V}$,与文献[17]中基础结构器件的实验值($R_{\text{on}}=6.6\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, $V_B=734\ \text{V}$)非常吻合,验证了所用材料参数和物理模型的准确性。

仿真所得 R_{on} 略低于实验值、 V_B 略大于实验值,这可能是由于目前对 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 材料缺陷和杂质特性研究仍未完善,在模型定义和参数选择时存在微小偏差。

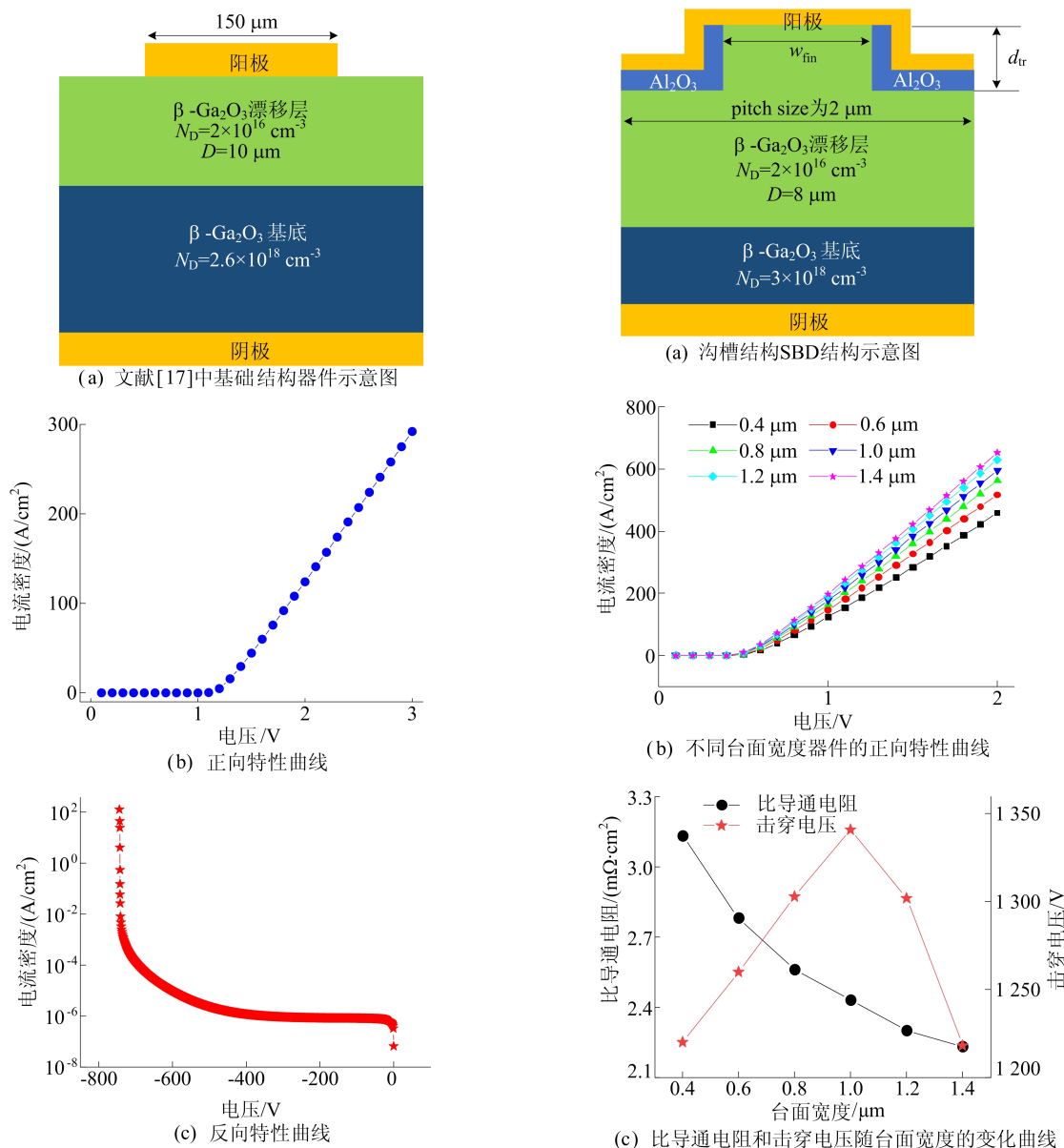


图 1 文献[17]中基础结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的器件结构和仿真结果

2 仿真结果与分析

2.1 台面宽度优化

本文沟槽结构 SBD 及其不同台面宽度的器件性能仿真结果如图 2 所示。

图 2a 所示为沟槽结构 SBD 单一元胞示意图,选取宽度(pitch size)为 $2\ \mu\text{m}$ 的 1 组沟槽结构单元,通过仿真台面宽度 w_{fin} 、沟槽深度 d_{tr} 对器件性能的影响,进行沟槽结构器件参数的优化。

图 2b 所示为沟槽深度 $1.0\ \mu\text{m}$ 、不同台面宽度的沟槽结构 SBD 正向特性曲线。从图 2b 可以看出,不同台面宽度($0.4\sim 1.4\ \mu\text{m}$)的器件正向开启电压基本保持 $0.6\ \text{V}$ 不变,但随着台面宽度的增大,正向特性曲线的斜率逐渐增大,比导通电阻从 $3.13\ \text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 减小至 $2.23\ \text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

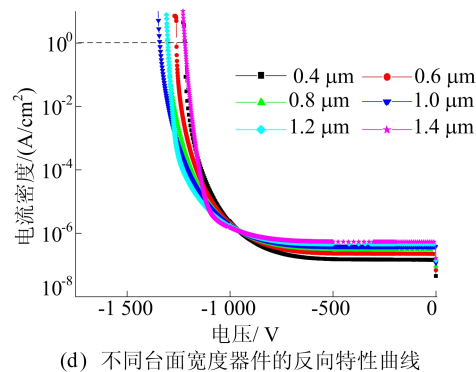


图 2 沟槽结构 SBD 及其不同台面宽度的器件性能仿真结果

从图 2c 可以看出,随着台面宽度的增大,比导通电阻减小的幅度也逐渐减缓。这是因为当漂移层的掺杂浓度及厚度一定时,制约器件导电电流的主要因素为台面宽度,随着台面宽度的增大,肖特基接触面积的占比不断增加,电流路径拓宽,

正向比导通电阻下降,但是随着台面宽度的进一步增大,电流受台面宽度的影响也逐渐减弱,所以正向比导通电阻的下降幅度变缓^[27]。

图 2d 所示为不同台面宽度器件的反向特性曲线。从图 2d 可以看出,随着台面宽度的增大,器件反向漏电流 I_R 由 147 nA/cm^2 逐渐增大到 539 nA/cm^2 。

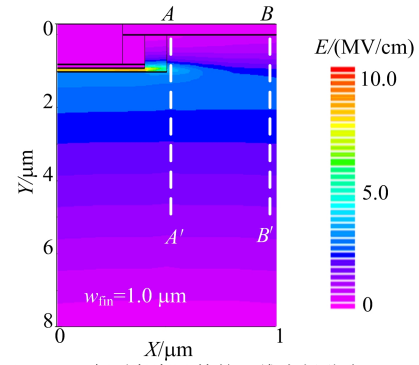
由图 2c 可知击穿电压先增加后减小:当台面宽度小于 $1.0 \mu\text{m}$ 时,随着台面宽度的增大,台面区对器件耐压的贡献增加,器件击穿电压增大;当台面宽度为 $1.0 \mu\text{m}$ 时,器件反向击穿电压达到最大值 1341 V ;之后随着台面宽度的增大,击穿电压开始减小。反向击穿电压的增大可归因于沟槽处 MIS 结构侧壁电子耗尽层对肖特基界面电场的屏蔽作用^[28],而当台面宽度较大($>1.0 \mu\text{m}$)时,这一屏蔽效果逐渐减弱,肖特基接触电场增大导致镜像力势垒降低,漏电流和隧穿电流增加,反向击穿电压随之减小^[29]。

不同台面宽度的沟槽结构 SBD 器件在 1 kV 反向偏压下的电场分布如图 3 所示。

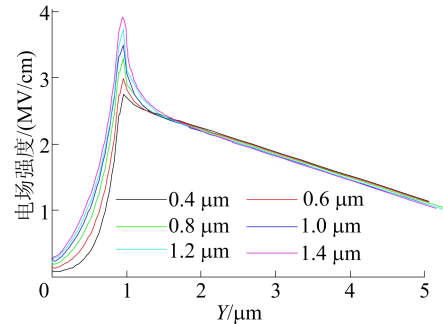
图 3b 所示为沿沟槽边缘(图 3a 中虚线 AA' 处)的电场强度随沟槽深度变化的曲线。因为电场集中效应, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 体内在沟槽底部拐角处的电场强度最高,随着台面宽度由 $1.4 \mu\text{m}$ 减小到 $0.4 \mu\text{m}$,沟槽底部最大的电场强度由 3.91 MV/cm 逐渐降低至 2.74 MV/cm ,所以较小的台面宽度有助于降低器件沟槽底部的电场强度,从而降低器件反向漏电流,提升击穿电压。

图 3c 所示为沿肖特基界面(图 3a 中虚线 BB' 处)的电场深度随沟槽深度变化的曲线。从图 3a 可以看出,当台面宽度为 $0.4 \mu\text{m}$ 时,肖特基界面 $Y=0 \mu\text{m}$ 处的电场强度最低(0.12 MV/cm),证明台面宽度较小时,沟槽结构对肖特基电场的屏蔽效果也较强。这是由于器件反向偏置时,耗尽区向沟槽之间扩展,相邻的耗尽区逐渐连通,在肖特基接触下方形成高势垒区,降低了肖特基界面电场。

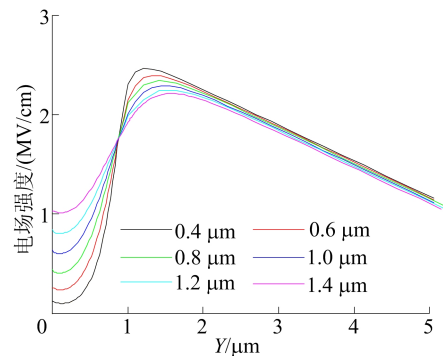
肖特基界面电场的降低,将减弱镜像力的作用,从而抑制镜像力引起的势垒降低,保持较低的反向漏电流和较高的击穿电压^[30]。但在这一台面宽度下,电场强度随着深度的增加迅速变大,在器件体内达到最大值,这会导致器件反向漏电流的增加,影响击穿特性。因此,器件击穿电压呈现随台面宽度的增加先增大而后下降的特性,结果如图 2c 所示。



(a) $1 \mu\text{m}$ 台面宽度器件的二维电场分布



(b) 沿沟槽边缘的电场强度随沟槽深度的变化



(c) 沿肖特基界面的电场强度随沟槽深度的变化

图 3 不同台面宽度器件在 1 kV 反向偏压下的电场分布

为合理选择台面宽度参数,本文计算了不同台面宽度下器件的功率品质因数(power figure of merit),计算公式如下:

$$P_{\text{FOM}} = \frac{V_{\text{B}}^2}{R_{\text{on}}} \quad (1)$$

功率品质因数的计算结果如图 4 所示。

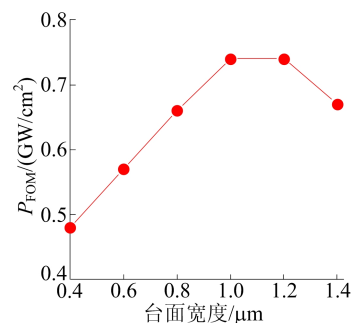


图 4 功率品质因数随台面宽度变化的曲线

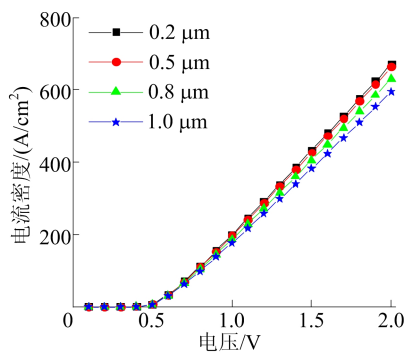
从图 4 可以看出,当台面宽度为 $1.0 \mu\text{m}$ 时,器件功率品质因数达到最大值 $0.74 \text{ GW}/\text{cm}^2$,此时,器件的反向漏电流为 $383 \text{ nA}/\text{cm}^2$,与文献[17]报道的击穿电压为 $1\ 232 \text{ V}$ 的沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 相当($I_R < 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$)。

因此,为保证良好的正向特性,同时尽量降低器件反向漏电流、提升器件的反向击穿电压,可采用台面宽度为 $1.0 \mu\text{m}$ 的沟槽结构。

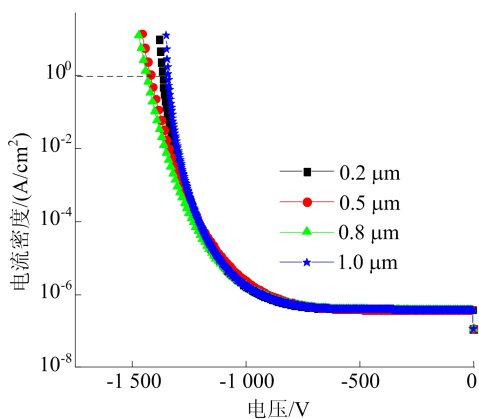
2.2 沟槽深度优化

在优化的台面宽度($1.0 \mu\text{m}$)下,本文继续探讨沟槽深度对器件性能的影响。

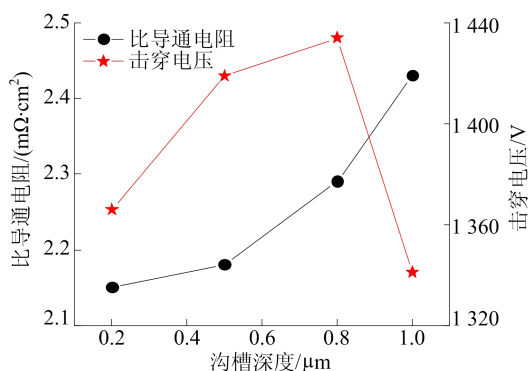
不同沟槽深度的沟槽结构 SBD 器件仿真结果如图 5 所示。



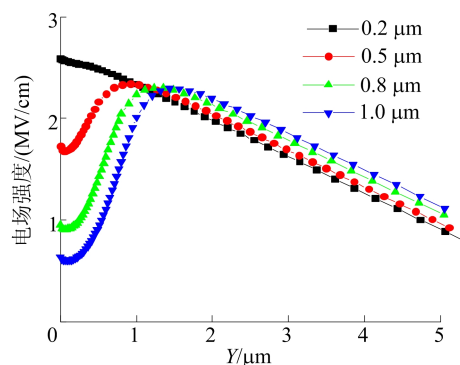
(a) 不同沟槽深度器件的正向特性曲线



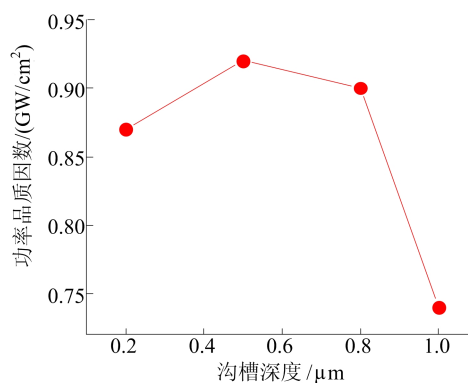
(b) 不同沟槽深度器件的反向特性曲线



(c) 比导通电阻和击穿电压随沟槽深度变化的曲线



(d) 1 kV 反向偏压下肖特基界面下方电场强度随沟槽深度变化的曲线



(e) 功率品质因数随沟槽深度的变化曲线

图 5 不同沟槽深度器件的仿真结果

图 5a 所示为不同沟槽深度器件的正向特性曲线,可以看出,随着沟槽深度的增加,正向特性曲线的斜率逐渐下降。

在电场集中效应和沟槽结构对肖特基电场屏蔽的共同作用下,器件反向击穿电压随着沟槽深度的增大先增加后减小,结果如图 5b 和图 5c 所示,击穿电压在沟槽深度为 $0.8 \mu\text{m}$ 时达到最大值 $1\ 434 \text{ V}$,继续增大沟槽深度至 $1.0 \mu\text{m}$,器件击穿电压显著下降至 $1\ 341 \text{ V}$ 。

由图 5c 可知,比导通电阻由 $2.15 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 增大至 $2.43 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$,表明随着沟槽深度的增加,沟道电阻随之增加^[31]。

图 5d 所示为不同沟槽深度器件在 1 kV 反向偏压下肖特基界面下方(图 3a 中虚线 BB' 处)的电场分布情况,从图 5d 可以看出,当沟槽深度从 $0.2 \mu\text{m}$ 增大到 $0.5 \mu\text{m}$ 时,肖特基界面下方的峰值电场由界面处的 $2.58 \text{ MV}/\text{cm}$ 降低至体内的 $2.34 \text{ MV}/\text{cm}$,下降约 10% ,而沟槽深度继续增大,峰值电场不再显著变化。

由图 5e 可知,沟槽深度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的器件功率品质因数达到最大值 $0.92 \text{ GW}/\text{cm}^2$,因此可采用深度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的沟槽结构提升器件性能,此时器件比导通电阻为 $2.18 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$,反向击穿

电压为 1 419 V。

2.3 3 种结构器件性能比较

为验证上述仿真结果,本文设计了台面宽度为 $1.0\ \mu\text{m}$ 、沟槽深度为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD,并与相同器件面积的基础结构 SBD 和场板结构 SBD 仿真结果相比较,结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6a 可知:基础结构 SBD 和场板结构 SBD 具有相同的开启电压 $0.5\ \text{V}$,而沟槽结构 SBD 的开启电压略增大为 $0.6\ \text{V}$;沟槽结构 SBD 比导通电阻为 $1.69\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$,略大于基础结构 SBD 比导通电阻 ($1.42\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) 和场板结构 SBD 比导通电阻 ($1.35\ \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)。

从图 6b 可以看出,沟槽结构 SBD 的反向击穿电压 V_B 相较于基础结构 SBD ($V_B=448\ \text{V}$)、场板结构 SBD ($V_B=977\ \text{V}$) 显著增大,达 $1\ 416\ \text{V}$,分别增大了 216% 和 45% 。值得注意的是,沟槽结构 SBD 击穿时反向电流增加较为平缓,这可能是由于沟槽结构中镜像力作用引起肖特基势垒降低,使器件击穿具有“软击穿”特性^[32]。

图 7 所示为 $300\ \text{V}$ 反向偏压下基础结构 SBD、场板结构 SBD 和沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的二维电场分布情况和沿虚线切线方向的电场强度分布曲线。

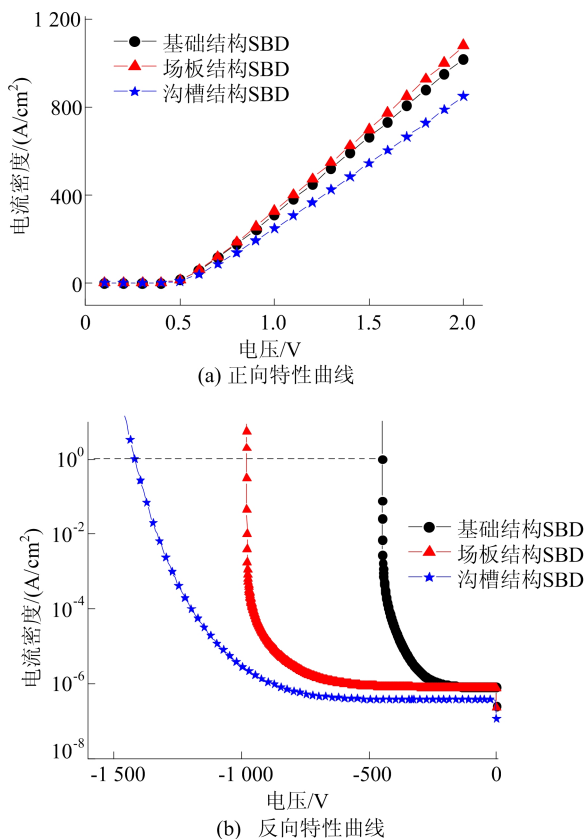


图 6 3 种结构 SBD 的正向和反向特性曲线

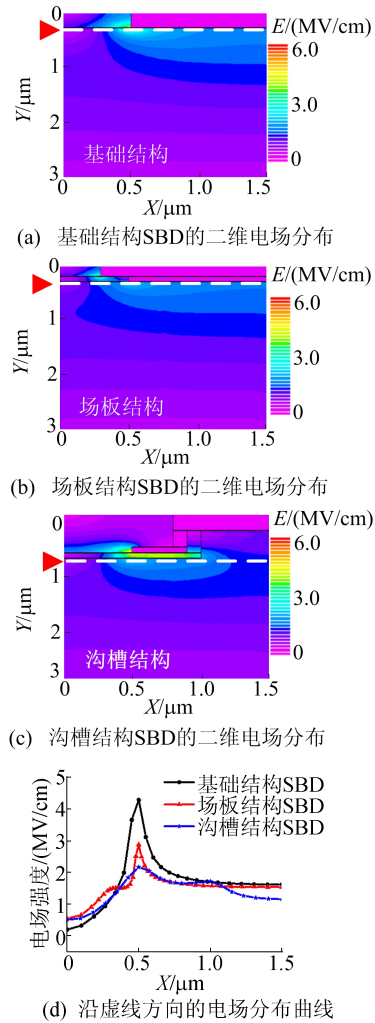


图 7 3 种结构 SBD 在 $300\ \text{V}$ 反向偏压下的电场分布

从图 7 可以看出:基础结构 SBD 具有显著的边缘电场集中效应,阳极金属边缘电场强度最大,达 $4.29\ \text{MV}/\text{cm}$,而器件体内的电场强度仅 $1.62\ \text{MV}/\text{cm}$,器件不能达到理想的击穿情况;场板结构 SBD 体内电场强度无显著变化,但是阳极金属边缘电场集中效应获得极大缓解,阳极金属边缘的峰值电场强度降为 $2.88\ \text{MV}/\text{cm}$;沟槽 SBD 沟槽底部边缘的峰值电场强度则进一步降低为 $1.72\ \text{MV}/\text{cm}$,同时,由于沟槽结构对主肖特基结电场的屏蔽作用,肖特基界面的最大电场强度从基础结构 SBD 的 $1.62\ \text{MV}/\text{cm}$ 、场板结构 SBD 的 $1.54\ \text{MV}/\text{cm}$ 显著降低至 $1.22\ \text{MV}/\text{cm}$,这将有效抑制镜像力效应对势垒的降低,保持良好的反向击穿特性。

基础结构、场板结构和沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的性能比较见表 2 所列。

表 2 中: V_{on} 为开启电压; R_{on} 为正向比导通电阻; V_B 为反向击穿电压; I_R 为反向漏电流; P_{FOM}

为功率品质因数。

表 2 基础结构、场板结构和沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的性能比较

参数	基础结构	场板结构	沟槽结构
V_{on}/V	0.5	0.5	0.6
$R_{on}/(\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.42	1.35	1.69
V_B/V	448	977	1 416
$I_R/(\text{nA}/\text{cm}^2)$	827	780	385
$P_{FOM}/(\text{GW}/\text{cm}^2)$	0.14	0.71	1.19

由表 2 可知:沟槽 SBD 的功率品质因数达 $1.19 \text{ GW}/\text{cm}^2$, 比基础结构 SBD 和场板结构 SBD 增加了 750% 和 68%;沟槽结构器件的反向漏电流减小超过 50%, 仅为 $385 \text{ nA}/\text{cm}^2$, 证明沟槽结构可以减弱镜像力作用。由于器件的可靠性会随着 SBD 的反向漏电流的变大而变差, 严重影响器件的输出性能, 因此沟槽结构可以显著提升 SBD 的器件性能。

本文设计的沟槽结构 SBD 相较于文献[16]中的器件最低比导通电阻($2.9 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)减小了 42%, 击穿电压与文献[17]中台面宽度 $2 \mu\text{m}$ 、沟槽深度 $2 \mu\text{m}$ 的沟槽结构器件实验结果相当, 而且器件性能仍可通过后续垂直沟槽结构^[18]的改进和叠加边缘场板结构^[19]技术进一步提升。

3 结 论

本文对电学性能进行仿真研究, 探讨了台面宽度和沟槽深度对沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 器件性能的影响。仿真结果表明, 当台面宽度为 $1.0 \mu\text{m}$ 、沟槽深度为 $0.5 \mu\text{m}$ 时, 沟槽 MIS 结构对肖特基界面电场的屏蔽效果最为显著, 抑制了镜像力效应, 防止势垒降低, 从而减小了器件的反向漏电流。与基础结构 SBD 和场板结构 SBD 相比, 沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 性能显著提升, 实现了兼具低开启电压(0.6 V)和高击穿电压($1 416 \text{ V}$)的良好器件性能, 比导通电阻仅为 $1.69 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 功率品质因数高达 $1.19 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。

本文的仿真工作有望为高性能沟槽结构 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的制备提供仿真数据指导。

[参 考 文 献]

[1] PEARTON S J, YANG J, CARY IV P H, et al. A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(1):011301.
 [2] ARMSTRONG K O, DAS S, CRESKO J. Wide bandgap semiconductor opportunities in power electronics[C]//2016 IEEE 4th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and

Applications, Fayetteville; IEEE, 2016:259-264.
 [3] YANG J, AHN S, REN F, et al. High breakdown voltage (-201) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky rectifiers[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(7):906-909.
 [4] SASAKI K, KURAMATA A, MASUI T, et al. Device-quality $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ epitaxial films fabricated by ozone molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(3):035502.
 [5] YANG J, AHN S, REN F, et al. High reverse breakdown voltage Schottky rectifiers without edge termination on Ga_2O_3 [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(19):192101.
 [6] 龙世兵, 叶建东, 吕元杰. 氧化镓半导体器件[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2022.
 [7] FARZANA E, ALEMA F, HO W Y, et al. Vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ field plate Schottky barrier diode from metal-organic chemical vapor deposition[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(16):162109.
 [8] LIN C H, YUDA Y, WONG M H, et al. Vertical Ga_2O_3 Schottky barrier diodes with guard ring formed by nitrogen ion implantation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(9):1487-1490.
 [9] HU Z, ZHAO C, FENG Q, et al. The investigation of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky diode with floating field ring termination and the interface states[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020, 9(2):025001.
 [10] GAO Y, LI A, FENG Q, et al. High-voltage $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky diode with argon-implanted edge termination[J]. Nanoscale Research Letters, 2019, 14(1):1-8.
 [11] KONISHI K, GOTO K, MURAKAMI H, et al. 1-kV vertical Ga_2O_3 field-plated Schottky barrier diodes[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(10):103506.
 [12] SHARMA R, XIAN M, LAW M E, et al. Design and implementation of floating field ring edge termination on vertical geometry $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ rectifiers[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A (Vacuum, Surfaces, and Films), 2020, 38(6):063414.
 [13] BALIGA B T. 功率半导体器件基础[M]. 韩郑生, 陆江, 宋李梅, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.
 [14] CHEN S, CHEN H, QIU Y, et al. Systematic design and parametric analysis of GaN vertical trench MOS barrier Schottky diode with p-GaN shielding rings[J]. Transactions on Electron Devices, 2021, 68(11):5707-5713.
 [15] HASEGAWA K, NISHIO G, YASUNISHI K, et al. Vertical GaN trench MOS barrier Schottky rectifier maintaining low leakage current at $200 \text{ }^\circ\text{C}$ with blocking voltage of 750 V [J]. Applied Physics Express, 2017, 10(12):121002.
 [16] SASAKI K, WAKIMOTO D, THIEU Q T, et al. First demonstration of Ga_2O_3 trench MOS-type Schottky barrier diodes[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(6):783-785.
 [17] LI W, HU Z, NOMOTO K, et al. 1 230 V $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ trench Schottky barrier diodes with an ultra-low leakage current of $< 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(20):202101.

- thesis in *Arabidopsis*, encodes a WD40 repeat protein[J]. Plant Cell, 1999, 11(7):1337-1349.
- [8] CONG L, QU Y, SHA G, et al. *PbWRKY75* promotes anthocyanin synthesis by activating *PbDFR*, *PbUFGT*, and *PbMYB106* in pear [J]. Physiologia Plantarum, 2021, 173(4):1841-1849.
- [9] 苏梦雨. MdWRKY71-L 和 MdJa2 调控苹果花青苷合成的分子机制[D]. 泰安:山东农业大学, 2022.
- [10] AN J P, ZHANG X W, YOU C X, et al. *MdWRKY40* promotes wounding-induced anthocyanin biosynthesis in association with *MdMYB1* and undergoes MdBT2-mediated degradation[J]. New Phytologist, 2019, 224(1):380-395.
- [11] DUAN S W, WANG J J, GAO C H, et al. Functional characterization of a heterologously expressed *Brassica napus WRKY41-1* transcription factor in regulating anthocyanin biosynthesis in *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant Science, 2018, 268:47-53.
- [12] 毛作霖. *MdHY5-MdWRKY41-MdMYBs* 转录因子级联调节红肉苹果花青苷和原花青素生物合成的机理[D]. 泰安:山东农业大学, 2021.
- [13] LI C, WU J, HU K D, et al. *PyWRKY26* and *PybHLH3* cotargeted the *PyMYB114* promoter to regulate anthocyanin biosynthesis and transport in red-skinned pears[J]. Horticulturae Research, 2020, 7:37.
- [14] 乔慧聪, 任向波, 吴秀丽, 等. 烟草新驱动蛋白基因 *NtTKR* 原核表达载体的构建、诱导表达及蛋白纯化[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14):24-26.
- [15] 李聪, 田培洁, 张宇, 等. 烟草花叶病毒 *P54* 基因的原核表达与蛋白纯化[J]. 福建农业学报, 2021, 36(2):209-214.
- [16] 杨旭颖, 安丽君. 拟南芥细胞周期调控因子 *KRP2* 的原核表达及蛋白纯化[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12):63-65.
- [17] 邹倩, 赵懿琛, 赵德刚. 杜仲 *Dirigent1* 基因的原核表达及蛋白纯化[J]. 分子植物育种, 2019, 17(1):86-91.
- [18] 陈蒙, 袁赫海, 张宇, 等. 山葡萄 *PAL* 基因原核表达载体的构建及表达蛋白纯化[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(5):888-893.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 202 页)

- [18] LI W, HU Z, NOMOTO K, et al. 2.44 kV Ga₂O₃ vertical trench Schottky barrier diodes with very low reverse leakage current [C]//2018 IEEE International Electron Devices Meeting. San Francisco: IEEE, 2018: 8.5.1-8.5.4.
- [19] 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, 2019, 41(1):107-110.
- [20] OTSUKA F, MIYAMOTO H, TAKATSUKA A, et al. Large-size (1.7 × 1.7 mm²) β-Ga₂O₃ field-plated trench MOS-type Schottky barrier diodes with 1.2 kV breakdown voltage and 10⁹ high on/off current ratio [J]. Applied Physics Express, 2021, 15(1):016501.
- [21] ZHOU H, ZHANG J, ZHANG C, et al. A review of the most recent progresses of state-of-art gallium oxide power devices [J]. Journal of Semiconductors, 2019, 40(1):011803.
- [22] ZHOU H, ZENG S, ZHANG J, et al. Comprehensive study and optimization of implementing p-NiO in β-Ga₂O₃ based diodes via TCAD simulation [J]. Crystals, 2021, 11(10):1186.
- [23] VERMA J, PANT S, KUMARI S, et al. Trench termination in Ga₂O₃-based power device: a simulation-based study [J]. Applied Nanoscience, 2022, 13:3255-3261.
- [24] LABED M, SENGOUGA N, MEFTAH A, et al. Leakage current modelling and optimization of β-Ga₂O₃ Schottky barrier diode with Ni contact under high reverse voltage [J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020, 9(12):125001.
- [25] LI W, SARASWAT D, LONG Y, et al. Near-ideal reverse leakage current and practical maximum electric field in β-Ga₂O₃ Schottky barrier diodes [J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(19):192101.
- [26] LV Y, WANG Y, FU X, et al. Demonstration of β-Ga₂O₃ junction barrier Schottky diodes with a Baliga's figure of merit of 0.85 GW/cm² or a 5 A/700 V handling capabilities [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(6):6179-6182.
- [27] LI W, NOMOTO K, HU Z, et al. Guiding principles for trench Schottky barrier diodes based on ultrawide bandgap semiconductors: a case study in Ga₂O₃ [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(10):3938-3947.
- [28] ZHANG Y, SUN M, LIU Z, et al. Novel GaN trench MIS barrier Schottky rectifiers with implanted field rings [C]//2016 IEEE International Electron Devices Meeting. San Francisco: IEEE, 2016: 10.2.1-10.2.4.
- [29] REN N, SHENG K. An analytical model with 2-D effects for 4H-SiC trench junction barrier Schottky diodes [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(12):4158-4165.
- [30] 尚也淳, 刘忠立, 王姝睿. SiC Schottky 结反向特性的研究 [J]. 物理学报, 2003, 52(1):211-216.
- [31] KONG M, HU Z, GAO J, et al. A New Ga₂O₃ trench Schottky barrier diode with improved forward conduction characteristics [C]//2021 IEEE 14th International Conference on ASIC. Kunming: IEEE, 2021: 1-4.
- [32] SUGIURA T, NAKANO N. Hard-and soft-breakdown modeling in (001) oriented β-Ga₂O₃ Schottky barrier diode [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 132(17):175703.

(责任编辑 胡亚敏)