



β -Ga₂O₃ SBD器件的解析模型与仿真研究

张弘鹏^{1*}, 郭亮良², 陈铖颖¹, 贾仁需², 元磊², 彭博², 张玉明², 栾苏珍³, 张宏怡¹, 张义门²

1. 厦门理工学院光电与通信工程学院, 厦门 361021;

2. 西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件重点实验室, 西安 710071;

3. 西安科技大学通信与信息工程学院, 西安 710054

*联系人, E-mail: 15771718620@163.com

收稿日期: 2022-12-24; 接受日期: 2023-03-08; 网络出版日期: 2023-06-09

国家自然科学基金(编号: 61874084, 62004153, U21A20501)、厦门市青年创新基金(编号: 3502Z20206074)、厦门市自然科学基金(编号: 3502Z20227070)、厦门市重大科技项目(编号: 3502Z20221022)、福建省中青年教师教育科研项目(编号: JAT220341)和厦门理工学院高层次人才科研项目(编号: YKJ22049R)资助

摘要 本文设计了不同电场调节策略的Ga₂O₃ SBD器件, 通过研究器件结构、钝化层方案下器件电学特性, 分析不同终端结构(场板结构FP、边缘终端结构ET、沟槽型Trench、高K钝化)下Ga₂O₃ SBD的结构设计. 此外本文结合理论分析和实验数据拟合, 完善了Ga₂O₃材料和器件模型, 通过对比实验数据验证了模型的正确性. 研究发现: (1) 高K钝化($\kappa > 100$)结合场板结构可有效舒缓表面电场并提升结终端效率, 2 μm Ga₂O₃ SBD采用BaTiO₃钝化场板可实现终端效率91.4%, $V_{\text{br}}=1.43$ kV, 巴利加优值BFOM=1.62 GW/cm², 七倍于Al₂O₃ FP SBD; (2) 采用BaTiO₃钝化的FP & ET复合终端可实现终端效率93.6%, $V_{\text{br}}=1.46$ kV, BFOM=0.41 GW/cm²; (3) 相较FP设计, SiO₂, Al₂O₃, HfO₂钝化的FP & Trench SBD更适于改善SBD导通电阻 $R_{\text{on,sp}}$, V_{br} 及BFOMs. 上述研究为优化Ga₂O₃功率器件性能提供了理论依据和参考.

关键词 氧化镓, Ga₂O₃ SBD, 器件仿真, 功率器件

PACS: 78.66.Hf, 52.59.Mv, 85.30.Fg, 85.30.De

1 引言

β 相氧化镓(β -Ga₂O₃)近年来吸引了越来越多国内外研究者的关注, 尤其是在电力电子领域被视为下一代大功率器件潜在的候选材料^[1-3]. 主要归因于 β -Ga₂O₃材料具有4.8 eV的禁带宽度、8 MV/cm的理论击穿场强

和高巴利加优值(BFOM), 以上参数均超越SiC及GaN理论极限值. 大尺寸 β -Ga₂O₃单晶目前可采用简单、低成本的熔融(Melt-Growth)工艺制备, 且可通过分子束外延(MBE)法、化学气相沉积(CVD)法获得高质量N型Ga₂O₃外延层^[1,4,5]. 目前Ga₂O₃功率器件研究主要集中在单极型器件MOSFET, SBD, 其中针对Ga₂O₃ SBD

引用格式: 张弘鹏, 郭亮良, 陈铖颖, 等. β -Ga₂O₃ SBD器件的解析模型与仿真研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 277311

Zhang H P, Guo L L, Chen C Y, et al. Analytical models and simulations analysis of β -Ga₂O₃ Schottky barrier diodes (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 277311, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0498

的研究愈发深入, 有望成为高压高功率器件研究的突破口.

国内外学者近年来已报道多款高性能Ga₂O₃功率器件, 如BaTiO₃钝化MOSFET实现击穿场强 $E_{br}=5.50$ MV/cm, BFOM ≈ 0.41 GW/cm²^[6], 无边终端设计的SBD实现击穿电压 $V_{br}=1.72$ kV, BFOM $=1.32$ GW/cm²^[7], BaTiO₃钝化SBD实现 $E_{br}=5.45$ MV/cm, BFOM $=1.47$ GW/cm²^[8], p-NiO/n-Ga₂O₃ PN结二极管实现 $V_{br}=2.41/8.32$ kV, BFOM $=5.18/13.2$ GW/cm²^[9,10]. 近年来金属场板^[8,11–13]、注入边缘终端^[14,15]、沟槽型^[16]、PN异质结二极管^[9,10,17,18]、超高K介质(如BaTiO₃)钝化^[6,8,19]等技术均报道用于提升Ga₂O₃二极管器件性能.

随着Ga₂O₃功率器件研究的深入, 采用器件数值模拟仿真(TCAD)探索结构设计优化成为必不可少的环节. 基于第一性原理仿真、霍尔测试及其他光学、电学表征方法, 研究者对β-Ga₂O₃材料特性有了更深刻的理解, 也有望完善适于TCAD仿真的β-Ga₂O₃材料物理模型. 本文将通过TCAD仿真建立β-Ga₂O₃ SBD的基本解析模型, 并结合文献实验数据以验证模型的准确性, 完善β-Ga₂O₃迁移率模型及碰撞电离模型, 研究器件终端结构设计对β-Ga₂O₃ SBD器件性能尤其是击穿特性的影响.

2 仿真建模

笔者曾报道基于β-Ga₂O₃横向MOSFET及纵向MOSFET的仿真建模及结构优化研究^[20–22], 对比β-Ga₂O₃晶向各异性([100], [010], [001]晶向)对器件性能的影响. 表1给出室温下β-Ga₂O₃的基本材料特性^[1,2,20,21], 包括禁带宽度 E_g 、迁移率 μ 、导带态密度 N_C 等. 实际β-Ga₂O₃ SBD多沿[001]晶向导电, 因此本文基于[001]晶向参数的基础上修正模型参数, 同文献SBD电学特性^[23]比较以验证模型的正确性.

2.1 不完全离化模型

载流子的不完全离化效应和补偿掺杂现象对于Ga₂O₃器件电学性能影响很大, 因此本文结合实验数据, 提出Ga₂O₃施主元素的不完全电离模型如下:

$$E_D = E_{D0} - \alpha_{ion} N_D^{1/3}, \quad (1)$$

表 1 β-Ga₂O₃的基本材料特性

Table 1 Basic β-Ga₂O₃ material properties

物理量	符号	数值
禁带宽度 (eV)	E_g	4.8 ^[20,21]
电子迁移率 (cm ² /V s)	μ	129.5 ^[20,21]
介电常数	κ_s	10.2 ^[1,2,20]
电子亲和能 (eV)	χ	4.0 ^[1,2,20]
导带态密度 (cm ⁻³)	N_C	3.72×10^{18} ^[1,20]
本征载流子浓度 (cm ⁻³)	n_i	1.79×10^{-22} ^[20]
电子有效质量	m_e/m_0	0.28 ^[1,2,20]
击穿场强 (MV/cm)	E_c	8 ^[20,21]

其中 E_D 为电离化的施主能级, E_{D0} 为施主元素(Si)零掺杂时的电离能级($E_{D0}=36.3$ meV^[24,25]), 拟合参数 $\alpha_{ion}=2.0609 \times 10^{-8}$ eV cm, 且采用电子有效质量 $0.28 m_0$ 和导带有效态密度 $N_C=3.72 \times 10^{18}$ cm⁻³^[20]. 此外β-Ga₂O₃ SBD近年来报道采用深受主离子注入(N^[14]或Mg^[15])的边缘终端, 本文结合文献^[25]的受主掺杂, 在仿真中采用如下参数: 电离化受主能级 $E_{A0}=770.0$ meV, $\alpha_{ion}=3.7838 \times 10^{-7}$ eV cm.

2.2 迁移率模型

对于功率Ga₂O₃器件, 电子迁移率是最重要的电学参数之一, 掺杂浓度、温度、高场漂移速度饱和效应等都对迁移率起到很大的影响. 基于Arora模型^[21,26], 本文构建低场强下β-Ga₂O₃迁移率模型如下:

$$\mu_{doping} = \mu_{min} + A_d / \left[1 + \left(\frac{N_{A0} + N_{D,0}}{N_0} \right)^{A^*} \right], \quad (2)$$

$$\mu_{min} = A_{min} \times \left(\frac{T_L}{300} \right)^{\alpha_m}, \quad \mu_d = A_d \times \left(\frac{T_L}{300} \right)^{\alpha_d}, \quad (3)$$

$$N_0 = A_N \times \left(\frac{T_L}{300} \right)^{\alpha_N}, \quad A^* = A_a \times \left(\frac{T_L}{300} \right)^{\alpha_a}. \quad (4)$$

上述公式中 A_{min} , A_N , A_d , A_a 为迁移率拟合参数, α_m , α_d , α_N , α_a 为温度拟合参数, 具体数值见表2.

由于载流子漂移速度同场强之间存在的非线性关系, 本文综合考虑转移电子效应^[20,26]和Caughy-Thomas模型^[20,21]以描述在高场强下β-Ga₂O₃迁移率饱和现象, 具体如下:

表 2 β -Ga₂O₃ 的迁移率模型参数Table 2 β -Ga₂O₃ mobility model parameters

拟合参数	电子数值	空穴数值
$A_{\min}$ (cm ² /V s)	45	0.016
A_d (cm ² /V s)	87.3	0.02
A_N (cm ⁻³)	1.10×10^{18}	1.10×10^{18}
A^*	0.76	0.76
α_m	-0.57	-0.57
α_d	0.76	0.76
α_N	2.6	2.6
α_a	-0.146	-0.146
μ_{low} (cm ² /V s)	129.5	0.03
β	3.35	0.0
E_c (MV/cm)	0.263	0.0
v_{sat} (cm/s)	1.708×10^7	2×10^7

$$\mu(E) = \frac{\mu_{\text{low}} + \frac{v_{\text{sat}}}{E} \times \left(\frac{E}{E_c} \right)^{\beta}}{1 + \left(\frac{E}{E_c} \right)^{\beta}}, \quad (5)$$

其中 v_{sat} 为电子饱和漂移速度, E_c 为临界击穿电场. [001]晶向的 β -Ga₂O₃采用如下拟合参数: $v_{\text{sat}} = 1.708 \times 10^7$ cm/s^[20], $E_c = 2.63 \times 10^{-1}$ MV/cm, $\beta = 3.35$ ^[20,27]. 推测 β -Ga₂O₃的 β 参数与Si具有相同的 $\beta(T)$ 关系^[28], 关系式如下:

$$\beta(T) = \beta_0 \times (T/300)^{0.66}. \quad (6)$$

2.3 碰撞离化模型

高场强下载流子之间的碰撞电离将影响器件内的局部电场, 是击穿特性仿真不可或缺的模型. 本文采用Okuto模型^[20], 碰撞离化系数 α 公式如下:

$$\alpha = a(1 + c(T_L - 300))E^{\gamma} \times \exp \left[- \left(\frac{b[1 + d(T_L - 300)]}{E} \right)^{\delta} \right], \quad (7)$$

式中参数 a , b 采用文献[20,28]参数(7.06×10^5 cm⁻¹和 2.1×10^7 V cm⁻¹ s⁻¹), 因未查阅到碰撞离化温度效应的相关报道, c , d , γ , δ 分别取值0, 0, 0, 1.

2.4 模型验证

在建立上述 β -Ga₂O₃ SBD的基本仿真模型后, 将仿真获得的电学特性同实验数据^[23]进行对比验证. 仿真采取文献[23]报道肖特基势垒高度 $\Phi_B = 1.1$ eV, 击穿电压 V_{br} 定义为 β -Ga₂O₃漂移层峰值电场强度大于8 MV/cm时的电压. 图1展示了仿真所得 β -Ga₂O₃ SBD的正向导通特性和反向击穿特性曲线同文献数据的对比, 仿真 $V_{\text{br}} = 808$ V接近文献报道(810 ± 3) V, 正向导通特性同实验数据也有较好的吻合度.

3 结果与讨论

本文结合 β -Ga₂O₃ SBD的器件结构设计进行仿真研究. 图2展示了本文采用的四种器件结构: (1) 无场板结构(Non Field Plate, NFP型)的NFP SBD; (2) 含场板结构(Field Plate, FP型)的FP SBD; (3) 含场板及沟槽的复合结构(Field Plate with Trench, FP & Trench型)的FP & Trench SBD; (4) 含FP及边缘注入区的复合结构(Edge Termination with Field Plate, FP & ET型)的FP & ET SBD. 以上结构均包含2 μ m厚n⁺-Ga₂O₃层(掺杂浓度 $N_d = 1 \times 10^{19}$ cm⁻³), 2 μ m厚n⁺-Ga₂O₃漂移层(掺杂浓度 $N_{\text{drift}} = 1 \times 10^{16}$ cm⁻³), 其中结构4的边缘注入区采用Mg受主掺杂 $N_A = 1 \times 10^{17}$ cm⁻³, 阳极及场板均采用金属Ni. 根据文献报道Ni/ β -Ga₂O₃的 $\Phi_B = (1.2 \pm 0.2)$ eV^[7,8,11,15,16,29], 因此本文采用 $\Phi_B = 1.2$ eV. 图2还展示了设计的关键结构参数, 包括漂移层厚度 h_{drift} 、钝化层厚度 h_p 、金属场板长度 L_{FP} 、沟槽深度 h_E 、边缘注入区宽度 W_{ET} 等, E_{sur} 为Ga₂O₃表面靠近场板边缘的电场强度. 表3展示本文采用的钝化层(SiO₂, Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂, TiO₂, BaTiO₃)相关参数, 其中钙钛矿型氧化物BaTiO₃具有超高介电常数 κ (>50), 具体数值大小与生长工艺参数及薄膜质量有较大关系, 因而选取两种数值.

首先 β -Ga₂O₃ NFP SBD的峰值电场经常积聚在肖特基结边缘, 使得器件局部电场提前达到8 MV/cm提前击穿, 使得器件 V_{br} 远低于理想值. 穿通型 β -Ga₂O₃ SBD理想击穿电压^[8] ($V_{\text{br,PT}}$)表达式如下:

$$V_{\text{br,PT}} = E_c h_{\text{drift}} - \frac{q N_{\text{drift}} h_{\text{drift}}^2}{2 \epsilon_s \epsilon_0}, \quad (8)$$

其中 h_{drift} , N_{drift} 为漂移层的厚度及载流子浓度, ϵ_s 为半导体介电常数. 据此求得2 μ m厚漂移层 β -Ga₂O₃ SBD

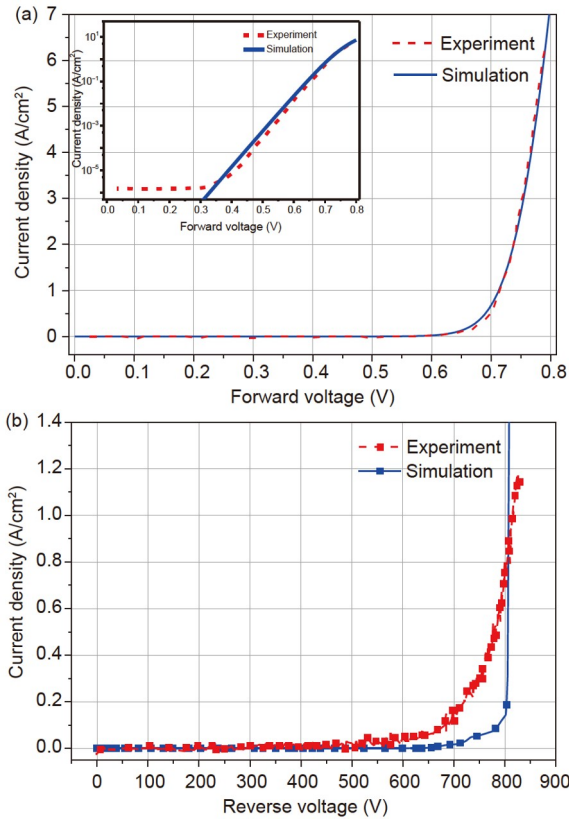


图 1 (网络版彩图) Ga_2O_3 SBD 仿真同实验数据^[23]的对比. (a) 正向导通特性曲线, 插图为对数坐标曲线; (b) 反向击穿特性曲线

Figure 1 (Color online) (a) Forward (inset of (a) shows the plot in log scale) and (b) reverse I - V characteristic of Ga_2O_3 vertical SBDs comparison of the simulated and experimental data [23].

$V_{\text{br,PT}} \approx 1.56$ kV, 远高于 NFP SBD V_{br} (~ 0.49 kV).

鉴于此, 本文研究不同终端结构设计和钝化方案下 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 电学性能. 首先, 本文研究 FP SBD 的电学性能, 图 3(a) 和 (b) 展示了采用不同钝化层和场板设计所得 FP SBD 的击穿特性, 由图 3(a) 可得 SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 , ZrO_2 , TiO_2 , BaTiO_3 钝化对应的优化厚度分别为 50, 100, 150, 200, 300, 300 nm, 进而基于上述厚度开展仿真, 如图 3(b) 所示可得场板 L_{FP} 的优化设计. 此外分析图 3 曲线趋势可以看出: (1) 钝化层厚度 h_{p} 增大, 使得钝化层所承受的电场小幅降低从而提高器件耐压; (2) SBD 的 V_{br} 随着金属场板长度 L_{FP} 增加表现出先增加后趋于饱和的趋势, 说明合理的场板尺寸设计有利于舒缓半导体表面电场的分布. 图 3(d) 对比了在其余结构设计一致的情况下不同钝化方案对 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面峰值电场 E_{sur} (位于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面靠近金属场板边缘

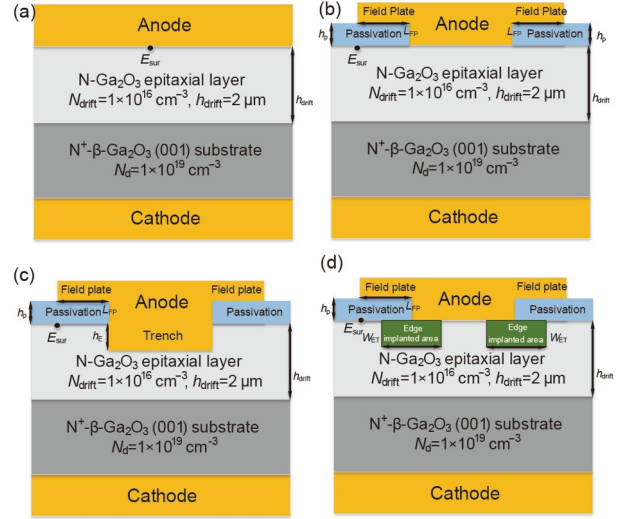


图 2 (网络版彩图) 仿真 Ga_2O_3 SBD 结构图及相关结构参数. (a) 无场板结构, NFP 型; (b) 含场板结构, FP 型; (c) 含场板及沟槽的复合结构, FP & Trench 型; (d) 含 FP 及边缘注入区的复合结构, FP & ET 型. 图中结构参数包括漂移层厚度 h_{drift} 、钝化层厚度 h_{p} 、金属场板长度 L_{FP} 、沟槽深度 h_{ep} 、边缘注入区宽度 W_{ET} . E_{sur} 为 Ga_2O_3 表面靠近场板边缘的电场强度

Figure 2 (Color online) Simulated $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBDs with (a) non field plate (NFP), (b) field plate (FP), (c) field plate with trench, FP & Trench, and (d) edge termination (ET) with field plate, FP & ET structures. The structural parameters include drift layer thickness h_{drift} , passivation layer thickness h_{p} , length of field plate L_{FP} , trench depth h_{ep} , the width of edge implanted area W_{ET} . E_{sur} is the electric field of Ga_2O_3 surface which near the edge of field plate.

表 3 本文仿真所采用的钝化层相关参数

Table 3 Basic passivation dielectric parameters in the simulation

钝化层介质	介电常数 κ	E_{g} (eV)	参考文献
SiO_2	3.9	8.6	[1,2]
Al_2O_3	8.9	6.8	[1,2]
HfO_2	14	5.7	[1,2,30]
ZrO_2	25	5.8	[1,2,30]
TiO_2	40	3.3	[31,32]
BaTiO_3 -1	100	3.4	[6,8,19]
BaTiO_3 -2	140	3.4	[6,8,19]

处)的影响, 可以看出采用高 K 钝化层可有效调整 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 整体电场分布, 尤其是采用 K 值较高的 TiO_2 , 或 BaTiO_3 钝化可大幅降低 E_{sur} , 从而提高 SBD V_{br} . 图 3(c) 展示了基于优化结构 ($h_{\text{p}}=300$ nm, $L_{\text{FP}}=2.5$ μm) 采用不同钝化层设计 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 的正向特性, 发现钝化层选取对 SBD 导通特性的影响可以忽略.

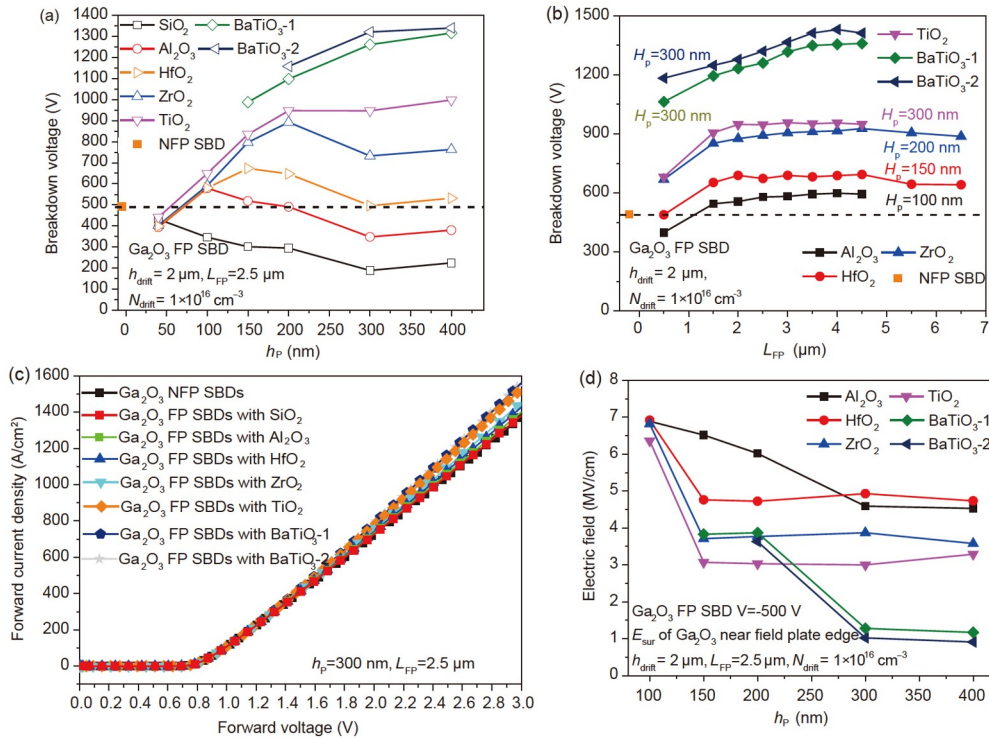


图 3 (网络版彩图) (a) 在相同场板设计下采用不同钝化的Ga₂O₃ FP SBD V_{br} 同钝化层厚度的关系; (b) 基于(a)所得钝化层厚度优化设计的FP SBD V_{br} 同场板长度的关系; (c) 采用不同钝化FP SBD正向特性曲线; (d) 加反向偏压-500 V时Ga₂O₃ SBD表面电场 E_{sur} 同钝化层厚度 h_p 的关系

Figure 3 (Color online) (a) The simulated V_{br} vs. h_p plot of β -Ga₂O₃ FP SBDs with the same L_{FP} , different h_p and dielectric; (b) the V_{br} vs. L_{FP} plot of β -Ga₂O₃ FP SBDs with different structural designs; (c) the forward J - V characteristics of Ga₂O₃ FP SBDs and NFP SBD with different passivation dielectric; (d) the E_{sur} vs. h_p plot of Ga₂O₃ FP SBDs when biased at -500 V.

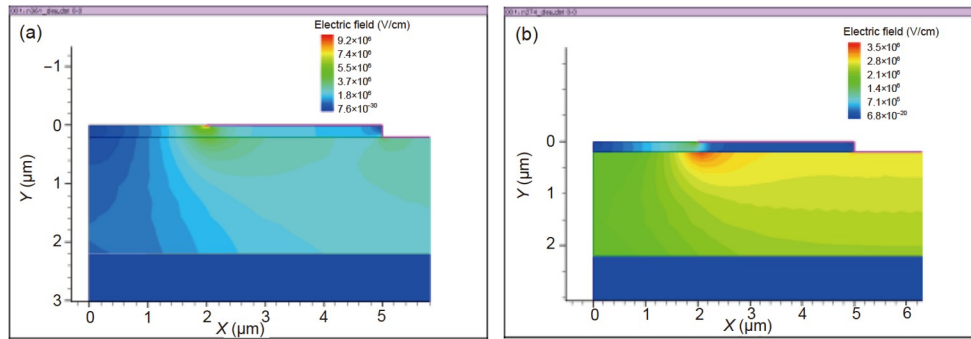


图 4 (网络版彩图)加-500 V反向偏压时 β -Ga₂O₃ FP SBD表面电场分布图. (a) 200 nm HfO₂, $L_{FP}=3.0$ μ m; (b) 200 nm BaTiO₃, $L_{FP}=3.0$ μ m

Figure 4 (Color online) The surface electric field distribution of β -Ga₂O₃ FP SBDs when biased at -500 V. (a) 200 nm HfO₂, $L_{FP}=3.0$ μ m; (b) 200 nm BaTiO₃, $L_{FP}=3.0$ μ m.

图4对比了采用HfO₂钝化和BaTiO₃钝化在反向偏压500 V时 β -Ga₂O₃ FP SBD内部的电场分布, 从图4中可以看出相比HfO₂钝化, 在相同钝化层厚度下BaTiO₃使得Ga₂O₃漂移层电场分布更均匀, 同时降低钝化层

电场, 有利于改善器件击穿特性. BaTiO₃钝化设计使 β -Ga₂O₃ SBD获得较高的终端击穿效率($\eta = V_{br}/V_{br,PT}$ ^[8]), $\kappa=100$ 时 $\eta=86.89\%$, $V_{br}=1.36$ kV; $\kappa=140$ 时 $\eta=91.43\%$, $V_{br}=1.43$ kV; 采用SiO₂, Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂, TiO₂等钝化方

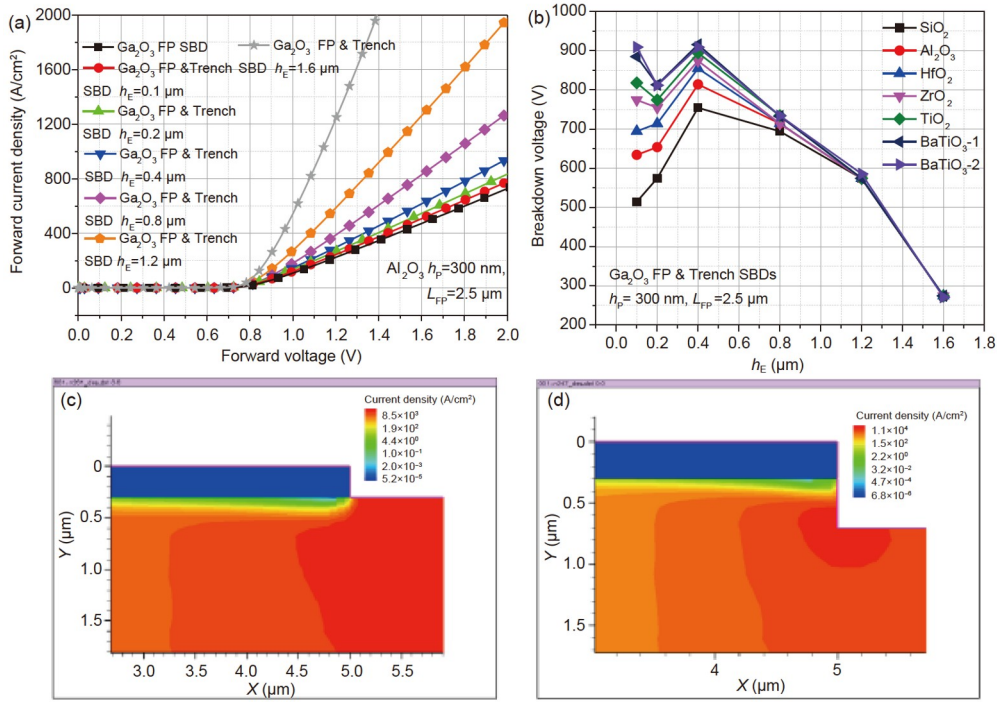


图 5 (网络版彩图) (a) β -Ga₂O₃ FP & Trench SBDs 与 FP SBD 的正向特性曲线(均采用 300 nm Al₂O₃); (b) 不同钝化层设计下 FP & Trench SBD V_{br} 同 h_E 的关系; FP SBD (c) 与 FP & Trench SBD (d) 沟道电流分布图(均用 300 nm Al₂O₃)

Figure 5 (Color online) (a) The forward J - V characteristics of β -Ga₂O₃ FP & Trench SBDs and FP SBDs (both own 300 nm Al₂O₃ layer); (b) the simulated V_{br} vs. h_E of β -Ga₂O₃ FP & Trench SBDs with different FP design (SiO₂, Al₂O₃, HfO₂, ZrO₂, TiO₂, BaTiO₃-1, BaTiO₃-2); current density distribution of (c) β -Ga₂O₃ FP SBDs and (d) FP & Trench SBD with the same 300 nm Al₂O₃ layer.

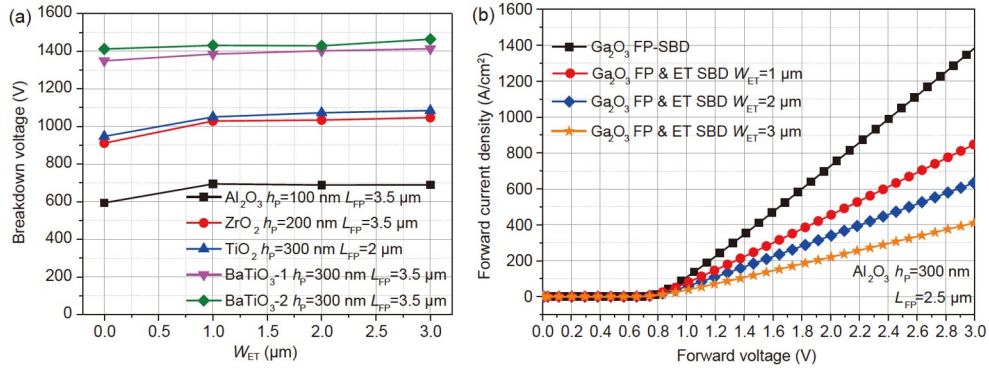


图 6 (网络版彩图) (a) β -Ga₂O₃ FP & ET SBDs 的 V_{br} 同钝化层参数设计的关系; (b) FP & ET SBDs 与 FP SBD 的正向特性曲线

Figure 6 (Color online) (a) The simulated V_{br} of β -Ga₂O₃ FP & ET SBDs with different FP design; (b) the forward J - V characteristics of FP and FP & ET SBDs.

案时器件终端效率有限, $\eta=38.3\% \sim 61.2\%$. 由图 3(c) 可知 FP SBD 的导通电阻 ($R_{on,sp}$) 稍高于 NFP SBD 3.2%–20.3%, 大概在 $1.26 \sim 1.53 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$. 由此对比不同 β -Ga₂O₃ SBD 的 BFOM ($V_{br}^2/R_{on,sp}$), BaTiO₃ 钝化 FP SBD BFOM 为 1.62 GW/cm^2 , 大概是 NFP SBD 的 11 倍 (0.15 GW/cm^2)、Al₂O₃ 钝化 FP SBDs 的 7 倍

(0.23 GW/cm^2).

其次本文对 β -Ga₂O₃ FP & Trench SBD (如图 2(c) 所示) 的电学性能进行仿真与分析, 如图 5 所示. 如图 5(a) 所示, 引入沟槽结构的 FP & Trench SBD 可有效提高正向导通电流 J , 阳极槽深 h_E 增大使得漂移层电阻降低、器件导通电流增大, 例如基于 Al₂O₃ 钝化的 FP &

Trench SBD随着 h_E 增大 $R_{on,sp}$ 从 $1.41\text{ m}\Omega\text{ cm}^2$ 下降至 $0.14\text{ m}\Omega\text{ cm}^2$. 如图5(b)所示, 槽深大于 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 时器件 V_{br} 大幅降低, 归因于如此深的沟槽设计使得金属场板无法有效地调节器件内部电场分布, 峰值电场因此积聚在沟槽边缘. 结合此前仿真和图5(b)比较发现采用 SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 , ZrO_2 钝化的FP & Trench SBD (浅槽 $h_E \ll 0.4\text{ }\mu\text{m}$)可获得比FP SBD更大的耐压; TiO_2 , BaTiO_3 钝化更适于FP SBD结构. 图5(c)和(d)对比了FP & Trench SBD与FP SBD正向导通电流分布, 引入沟槽结构使得导通电流更加集中于沟道表面和沟槽拐角处, 因而提高导通电流密度.

基于以上研究, 本文对 Ga_2O_3 FP & Trench SBD的器件设计及相应的性能进行对比与评估. 深槽设计($h_E \gg 0.8\text{ }\mu\text{m}$)虽然能改善导通特性但同时大幅恶化击穿特性; 当浅槽设计($h_E \ll 0.4\text{ }\mu\text{m}$)结合典型的 SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 钝化时, FP & Trench SBD比FP SBD V_{br} 提高24.1%–74.7%, $R_{on,sp}$ 降低6.3%–25.2%, 因此提升BFOM; 基于 BaTiO_3 钝化的浅槽FP & Trench SBD相比FP SBD整体性能降低, BFOM降低27.8%–44.3%, V_{br} 降低36.4%–40.2%. 综上可知 SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 钝化更适于 Ga_2O_3 FP & Trench SBD结构($h_E \ll 0.4\text{ }\mu\text{m}$); BaTiO_3 钝化更适合用于 Ga_2O_3 FP SBD结构.

最后本文对含FP及边缘注入区的复合结构的 Ga_2O_3 FP & ET SBD进行仿真研究, 该边缘注入区可通过深受主元素离子注入实现, 仿真中采用Mg注入. 图6展示了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ FP & ET SBD仿真的 V_{br} 、正向导通特性同结构设计之间的关系, 图6(a)同此前仿真对比可知FP & ET复合结构相较FP SBD设计可小幅提升 V_{br} , 其中采用 Al_2O_3 , HfO_2 , ZrO_2 , TiO_2 钝化可增大13.2%–16.9%, 采用 BaTiO_3 钝化可增大2.4%–3.9%; 另一方面由图6(b)可见边缘注入区变宽虽然对器件影响较小,

但会导致导通特性恶化, FP & ET复合结构相较FP SBD的 $R_{on,sp}$ 增大66.4%–245.3%. BaTiO_3 钝化的FP & ET SBD具有 $V_{br}=1.46\text{ kV}$, $\eta=93.6\%$, $\text{BFOM}=0.41\text{ GW/cm}^2$. FP & ET SBD的仿真结果可能受到不完全电离模型受主参数误差的影响, 击穿特性仿真的精确性有待优化. 基于上述TCAD仿真可推测FP & ET结构可有效提升器件耐压, 但深受主掺杂边缘终端的引入也会带来 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 漂移层半导体电阻增大而增大导通电阻. 采用超宽禁带半导体异质结实现FP & ET复合终端有望实现更好的效果, 有待进一步研究, 例如 $\text{p-NiO/n-Ga}_2\text{O}_3$ PN结已在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 双极型二极管得到应用与报道^[9,10].

4 结论

本文通过理论分析和实验数据拟合, 完善了 Ga_2O_3 的材料和器件模型(包括迁移率模型、不完全电离模型、碰撞电离模型等), 通过和文献SBD的流片数据对比, 验证了模型的准确性. 为了提升 Ga_2O_3 功率SBD的器件性能, 本文研究对比四种不同结构设计的器件性能. 基于不同钝化方案及结构尺寸器件电学特性仿真分析发现: (1) 采取 BaTiO_3 钝化的场板结构FP SBD可大幅提高器件击穿电压、结终端效率及BFOM, 实现终端效率最优 $\eta=91.4\%$, $V_{br}=1.43\text{ kV}$, 巴利加优值 $\text{BFOM}=1.62\text{ GW/cm}^2$; (2) 浅沟槽结合场板的复合终端FP & Trench SBD更有利于提升器件导通特性; (3) 边缘终端结合 BaTiO_3 钝化场板的FP & ET复合结构在提升击穿电压、终端效率的同时会增大导通电阻, 实现终端效率 $\eta=93.6\%$, $V_{br}=1.46\text{ kV}$, $\text{BFOM}=0.41\text{ GW/cm}^2$. 以上研究为日后优化 Ga_2O_3 SBD器件性能提供理论依据和参考.

参考文献

- 1 Zhang H, Yuan L, Tang X, et al. Progress of ultra-wide bandgap Ga_2O_3 semiconductor materials in power MOSFETs. *IEEE Trans Power Electron*, 2020, 35: 5157–5179
- 2 Pearton S J, Yang J, Cary IV P H, et al. A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices. *Appl Phys Rev*, 2018, 5: 011301
- 3 Dong H, Xue H, He Q, et al. Progress of power field effect transistor based on ultra-wide bandgap Ga_2O_3 semiconductor material. *J Semicond*, 2019, 40: 011802
- 4 Chen Y, Ning H, Kuang Y, et al. Band alignment and polarization engineering in $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ ferroelectric heterojunction. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 277311
- 5 Xu B, Hu J, He X, et al. Effect of growth temperature on the characteristics of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films grown on 4H-SiC (0001) substrates by low

- pressure chemical vapor deposition. In: Proceedings of the 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu, 2021. 5–8
- 6 Kalarickal N K, Xia Z, Huang H L, et al. β -($\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}$) $_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ double heterojunction transistor with average field of 5.5 MV/cm. *IEEE Electron Device Lett*, 2021, 42: 899–902
 - 7 He Q, Hao W, Zhou X, et al. Over 1 GW/cm² vertical Ga_2O_3 Schottky barrier diodes without edge termination. *IEEE Electron Device Lett*, 2022, 43: 264–267
 - 8 Roy S, Bhattacharyya A, Ranga P, et al. High-k oxide field-plated vertical (001) β - Ga_2O_3 Schottky barrier diode with Baliga's figure of merit over 1 GW/cm². *IEEE Electron Device Lett*, 2021, 42: 1140–1143
 - 9 Wang Y, Gong H, Lv Y, et al. 2.41 kV vertical p-NiO/n- Ga_2O_3 heterojunction diodes with a record Baliga's figure-of-merit of 5.18 GW/cm². *IEEE Trans Power Electron*, 2022, 37: 3743–3746
 - 10 Zhang J, Dong P, Dang K, et al. Ultra-wide bandgap semiconductor Ga_2O_3 power diodes. *Nat Commun*, 2022, 13: 3900
 - 11 Konishi K, Goto K, Murakami H, et al. 1-kV vertical Ga_2O_3 field-plated Schottky barrier diodes. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 103506
 - 12 Yang J, Ren F, Tadjer M, et al. 2300 V reverse breakdown voltage Ga_2O_3 Schottky rectifiers. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2018, 7: Q92–Q96
 - 13 Allen N, Xiao M, Yan X, 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/cm². *IEEE Electron Device Lett*, 2019, 40: 1399–1402
 - 14 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. *IEEE Electron Device Lett*, 2019, 40: 1487–1490
 - 15 Zhou H, Feng Q, Ning J, et al. High-performance vertical β - Ga_2O_3 Schottky barrier diode with implanted edge termination. *IEEE Electron Device Lett*, 2019, 40: 1788–1791
 - 16 Li W, Nomoto K, Hu Z, et al. Field-plated Ga_2O_3 trench Schottky barrier diodes with a $\text{BV}^2/R_{\text{on,sp}}$ of up to 0.95 GW/cm². *IEEE Electron Device Lett*, 2020, 41: 107–110
 - 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. *Appl Phys Lett*, 2020, 117: 022104
 - 18 Hao W, He Q, Zhou K, et al. Low defect density and small I - V curve hysteresis in NiO/ β - Ga_2O_3 pn diode with a high PFOM of 0.65 GW/cm². *Appl Phys Lett*, 2021, 118: 043501
 - 19 Xia Z, Chandrasekar H, Moore W, et al. Metal/BaTiO₃/ β - Ga_2O_3 dielectric heterojunction diode with 5.7 MV/cm breakdown field. *Appl Phys Lett*, 2019, 115: 252104
 - 20 Guo L, Luan S, Zhang H, et al. Analytical model and structure of the multilayer enhancement-mode β - Ga_2O_3 planar MOSFETs. *IEEE Trans Electron Devices*, 2022, 69: 682–689
 - 21 Guo L, Zhang Y, Luan S, et al. Study on a novel vertical enhancement-mode Ga_2O_3 MOSFET with FINFET structure. *Chin Phys B*, 2022, 31: 017304
 - 22 Guo L L, Luan S Z, Zhang H P, et al. Study on self heating effect of enhancement-mode Ga_2O_3 vertical MOSFET (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2022, 52: 297307 [郭亮良, 栾苏珍, 张弘鹏, 等. 垂直增强型氧化镓MOSFET器件自热效应研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 297307]
 - 23 Yang J, Ahn S, Ren F, et al. High reverse breakdown voltage Schottky rectifiers without edge termination on Ga_2O_3 . *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 192101
 - 24 Wong H Y, Tenkeu A C F. Advanced TCAD simulation and calibration of gallium oxide vertical transistor. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2020, 9: 035003
 - 25 Irmscher K, Galazka Z, Pietsch M, et al. Electrical properties of β - Ga_2O_3 single crystals grown by the Czochralski method. *J Appl Phys*, 2011, 110: 063720
 - 26 Barnes J J, Lomax R J, Haddad G I. Finite-element simulation of GaAs MESFET's with lateral doping profiles and submicron gates. *IEEE Trans Electron Devices*, 1976, 23: 1042–1048
 - 27 Ma N, Tanen N, Verma A, et al. Intrinsic electron mobility limits in β - Ga_2O_3 . *Appl Phys Lett*, 2016, 109: 212101
 - 28 Caughey D M, Thomas R E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field. *Proc IEEE*, 1967, 55: 2192–2193
 - 29 Sasaki K, Wakimoto D, Thieu Q T, et al. First demonstration of Ga_2O_3 trench MOS-type Schottky barrier diodes. *IEEE Electron Device Lett*, 2017, 38: 783–785
 - 30 Wheeler V D, Shahin D I, Tadjer M J, et al. Band alignments of atomic layer deposited ZrO₂ and HfO₂ high-k dielectrics with (–201) β - Ga_2O_3 . *ECS J Solid State Sci Technol*, 2017, 6: Q3052–Q3055

- 31 Perego M, Seguni G, Scarel G, et al. Energy band alignment at TiO₂/Si interface with various interlayers. *J Appl Phys*, 2008, 103: 043509
- 32 Shen K, Wu K, Wang D. Band alignment of ultra-thin hetero-structure ZnO/TiO₂ junction. *Mater Res Bull*, 2014, 51: 141–144

Analytical models and simulations analysis of β -Ga₂O₃ Schottky barrier diodes

ZHANG HongPeng^{1*}, GUO LiangLiang², CHEN ChengYing¹, JIA RenXu², YUAN Lei², PENG Bo², ZHANG YuMing², LUAN SuZhen³, ZHANG HongYi¹ & ZHANG YiMen²

¹ School of Opto-Electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, China;

² The Key Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China;

³ College of Communication and Information Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

The device performance of β -Ga₂O₃ Schottky barrier diodes (SBDs) with various structures is investigated using technology computer-aided design simulation. To mitigate field crowding at the electrode edge, three field management strategies (field plate (FP), trench anode, implanted edge termination (ET), using various passivation, such as SiO₂, Al₂O₃, HfO₂, BaTiO₃) are investigated. After reviewing various models and parameters in the present literature, calibrated models for technology computer-aided design simulation of β -Ga₂O₃ power SBDs are established. High-permittivity ($\kappa > 100$) FPs effectively smooth the surface field and improve termination efficiency. β -Ga₂O₃ SBDs with a 2- μ m drift layer and BaTiO₃ FPs provide high termination efficiency ($\eta = 91.4\%$), breakdown voltage ($V_{br} = 1.43$ kV), and reasonable BFOM (1.62 GW/cm², 7 times of FP SBDs using Al₂O₃). Additionally, FP & ET with BaTiO₃ provide maximum V_{br} ($V_{br} = 1.46$ kV) and high termination efficiency ($\eta = 93.6\%$) with comparable BFOM (0.41 GW/cm²). Furthermore, when compared with FP-SBDs, FP & Trench SBDs with SiO₂, Al₂O₃, and HfO₂ can improve $R_{on,sp}$, V_{br} , and BFOMs. All of these provide theories and references for optimizing Ga₂O₃ device performance in the future.

gallium oxide, Ga₂O₃ SBD, device simulation, power device

PACS: 78.66.Hf, 52.59.Mv, 85.30.Fg, 85.30.De

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0498](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0498)