

SGT-MOSFET 电场解析模型的建立^{*}苏乐 王彩琳[†] 杨武华 梁晓刚 张超

(西安理工大学电子工程系, 西安 710048)

(2023 年 4 月 7 日收到; 2023 年 4 月 18 日收到修改稿)

屏蔽栅沟槽金属氧化物半导体场效应晶体管 (SGT-MOSFET) 在体内引入了纵向接源电极的屏蔽栅极, 可以辅助耗尽漂移区, 其耐压原理与沟槽 MOSFET (VUMOSFET) 不同. 本文以 110 V 左右结构的 SGT-MOSFET 为研究对象, 通过数值仿真、理论分析以及解析建模, 研究了不同结构的耐压原理以及结构参数与电场强度分布的相关性; 建立了与器件各个结构参数相关的电场解析模型, 为器件结构设计提供了理论依据; 并引入雪崩载流子对小电流下的电场解析模型进行了修正, 使得解析结果和仿真结果吻合较好; 通过修正后的电场解析模型提取了最优电场下的场氧厚度, 使得相应产品的静、动态特性得到明显改善, 从而极大地提升了器件的性能.

关键词: SGT-MOSFET, 电场解析模型, 雪崩载流子, 场氧厚度**PACS:** 85.30.Mn, 85.30.Pq, 85.30.Tv**DOI:** 10.7498/aps.72.20230550

1 引言

屏蔽栅沟槽金属氧化物半导体场效应晶体管 (SGT-MOSFET) 是一种新型的功率 MOSFET 器件, 其不仅具有传统深沟槽 MOSFET 低导通损耗的优点, 同时也具有更低的开关损耗^[1-5]. 目前 SGT-MOSFET 作为开关器件主要应用于新能源电动车、新型光伏发电、节能家电等领域的核心功率控制部件, 其性能与可靠性直接决定了系统的能源转换效率和可靠性^[6-9].

对于 SGT-MOSFET 性能的提升, 一方面可以通过结构改进来实现, 如重掺杂 n 型区结构、双分离栅结构、不同介电常数场氧层结构、浮空 n 柱结构、pn 掺杂多晶硅屏蔽栅结构、多层外延结构、浮空电极结构、窄栅低 k 介质层结构、p+埋层结构等^[10-18]. 另一方面可以通过参数优化来实现, 这就需要建立与器件结构参数相关的电场解析模型.

Zhang 等^[19,20] 在研究横向扩散金属氧化物半导体 (LDMOS), SGT-MOSFET 阻断状态下漂移区的电场模型时, 通过借鉴 RESURF 技术相关理论给出了该类器件的电场优化条件判据, 为器件结构设计提供了重要的理论依据.

实际上 SGT-MOSFET 不仅由沟槽间漂移区来承受耐压, 还包括体区以及沟槽底部漂移区的耐压区, 因此有必要建立更加完整的电场解析模型来对器件结构参数进行优化, 从而最大限度的提高器件性能. 本文以 110 V 左右结构的 SGT-MOSFET 为研究对象, 通过数值仿真、理论分析以及解析建模, 研究不同结构的耐压原理以及结构参数与电场强度分布的相关性; 建立了与结构参数相关的电场解析模型, 并通过引入雪崩载流子对其进行了修正; 通过修正后的电场解析模型提取了最优电场下的场氧厚度, 从而极大地改善了相应产品的性能.

^{*} 陕西省“两链融合”重点研发项目 (批准号: 2021LLRH-02)、陕西省教育厅科研计划项目 (批准号: 22JK0484) 和陕西省科学技术厅自然科学基金计划 (批准号: 2023-JC-QN-0764) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangcailin8511@xaut.edu.cn

2 仿真模型

2.1 结构模型

110 V SGT-MOSFET 产品的扫描电子显微镜 (SEM) 照片如图 1 所示. 通过 SEM 照片提取的元胞各区域尺寸及扩展电阻测试 (SRP) 技术获得的各区域掺杂浓度如表 1 所示. 仿真中通过面积因子将器件有源区的面积设置为和产品一致的 $2.57 \text{ mm} \times 3.59 \text{ mm}$ (0.09 cm^2).

为对比分析建立了如图 2 所示的传统沟槽 MOSFET (VUMOSFET)、电荷耦合 MOSFET (CCMOSFET)、SGT-MOSFET 结构模型, 其除了栅电极不同外, 其他参数均一致.

表 1 SGT-MOSFE 产品具体结构参数
Table 1. The structural parameters of SGT-MOS-FET product.

参数	掺杂浓度/ cm^{-3}	厚度/宽度($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)
n+源区	5.0×10^{19}	0.30
p体区	1.3×10^{17}	0.80
p漂移区	1.5×10^{16}	7.40
p+衬底	1.5×10^{19}	15.00
沟槽深度①	—	4.70
屏蔽栅深度②	—	4.30
控制栅深度③	—	1.00
单元胞宽度④	—	3.20
沟槽宽度⑤	—	1.80
台面宽度⑥	—	1.40
场氧厚度⑦	—	0.58

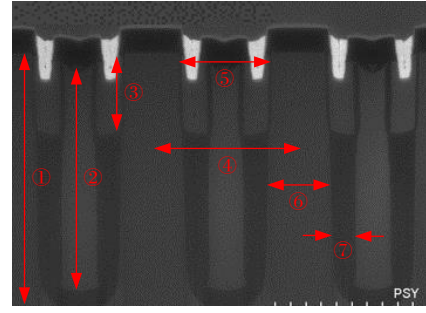


图 1 SGT-MOSFE 产品 SEM 图

Fig. 1. The SEM photo of SGT-MOSFE product.

2.2 栅电荷测试电路模型

栅电荷是指器件栅源电压上升到指定数值时, 所需要对栅极输入的总电荷量, 是衡量 MOSFET 器件开关速度快慢的重要指标. 图 3 所示为栅电荷测试电路及测试波形. 在 $0-t_1$ 阶段, 电流源 I_g 对栅源电容充电, 栅源电压持续上升, 但此时栅源电压仍小于器件阈值电压 V_{TH} , 器件并未导通; 在 t_1-t_2 阶段, 电流源 I_g 对栅源电容继续充电, 栅源电压持续上升, 在 t_1 时刻栅源电压等于 V_{TH} , 器件导通; 在 t_2-t_3 阶段, 电流源 I_g 对栅漏电容进行充电, 此时栅源电压维持不变, 对应的电压值为平台电压 V_{GP} ; 在 t_3-t_4 阶段, 电流源 I_g 继续对栅电容进行充电, 直到栅源电压上升到指定数值 V_{GS} , 这一部分电荷称为过充电荷. 因此总的栅电荷 Q_G 包括栅源电荷 Q_{GS} 、栅漏电荷 Q_{GD} 以及栅源电压从 V_{GP} 上升至 V_{GS} 时所需的过冲电荷.

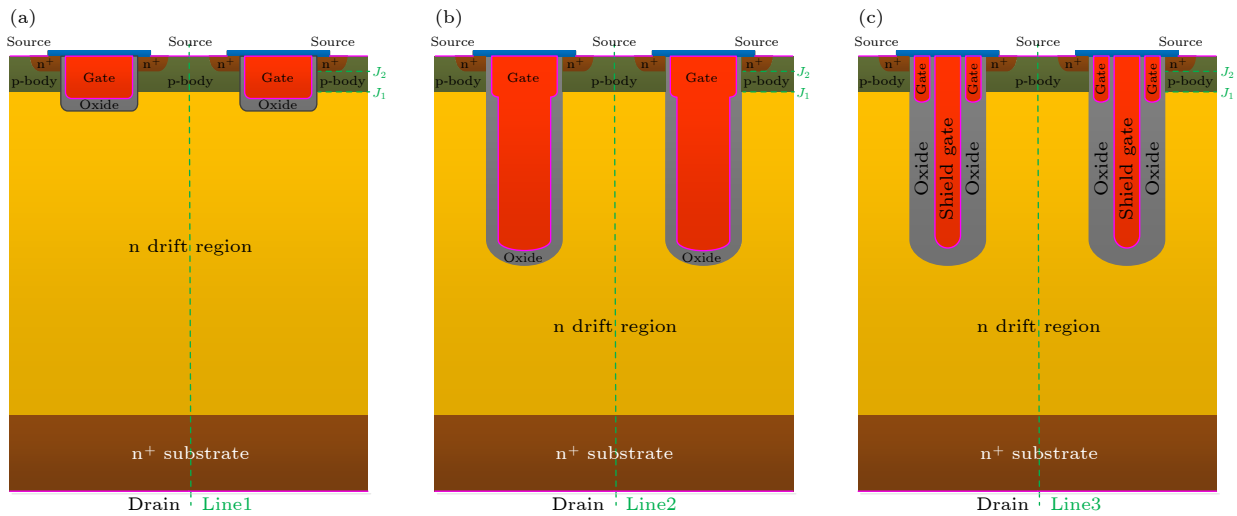


图 2 两元胞 VUMOSFET (a), CCMOSFET (b), SGT-MOSFET (c) 结构图

Fig. 2. The structures of two-cell VUMOSFET (a), CCMOSFET (b), SGT - MOSFET (c).

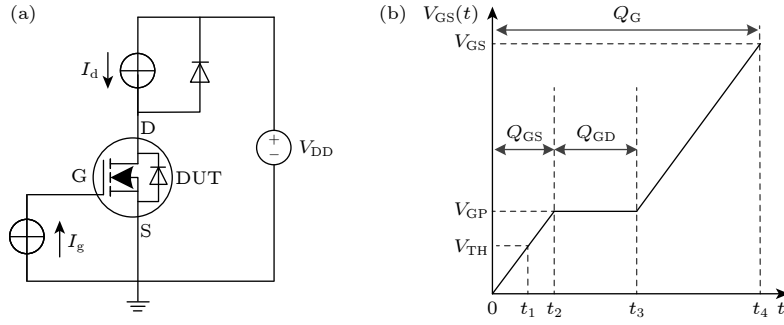


图 3 (a) 栅电荷测试电路; (b) 栅电荷测试波形

Fig. 3. (a) Testing circuit of the gate charge; (b) test waveform of the gate charge.

2.3 物理模型

仿真所采用的物理模型包括禁带窄化模型; 依赖于掺杂、温度、载流子-载流子散射以及高电场造成的载流子漂移速度饱和的迁移率模型; 受沟道表面横向电场散射影响的迁移率退化模型; 依赖于掺杂和温度的 SRH (Shockley-Read-Hall) 体复合模型; 在栅氧与硅交界处采用 SRH 表面复合模型, 俄歇 (Auger) 复合模型; vanOverstraeten and de Man 的雪崩产生模型。

3 仿真结果与分析

仿真 VUMOSFET, CCMOSFET, SGT-MOSFET 在 50 mA 电流下的击穿曲线以及通过曲线示踪器 (B1505 A) 测试的 SGT-MOSFET 产品的击穿曲线如图 4 所示。在相同漂移区掺杂下, CCMOSFET 和 SGT-MOSFET 由于体内场板的引入, 击穿电压相比于 VUMOSFET 分别提升了 91% 和 140%。场氧厚度为 $0.58 \mu\text{m}$ 的 SGT-MOSFET 击穿电压比场氧厚度为 $0.28 \mu\text{m}$ 的 CCMOSFET 提升了 25%, 而在相同的 $0.58 \mu\text{m}$ 场氧厚度下两者击穿电压一致, 表明 CCMOSFET 和 SGT-MOSFET 的耐压原理相同。并且 SGT-MOSFET 击穿曲线的仿真结果与测试结果相符合。

沿图 2 中虚线 1—3 截取的 3 种不同结构 MOSFET 的电场强度分布曲线如图 5 所示。VUMOSFET 在阻断状态下由 n 漂移区和 p 基区形成的 J_1 结来承担电压, 此处会产生一个电场峰值。CCMOSFET, SGT-MOSFET 由于体内场板的引入, 在 J_1 结和沟槽底部会产生两个电场峰值, 从而会进一步优化器件体内的电场强度分布, 提高器件击穿电压。可以看出 SGT-MOSFET 的电场强度分布比 CCMOSFET 更加均匀, 因此击穿电压更高。

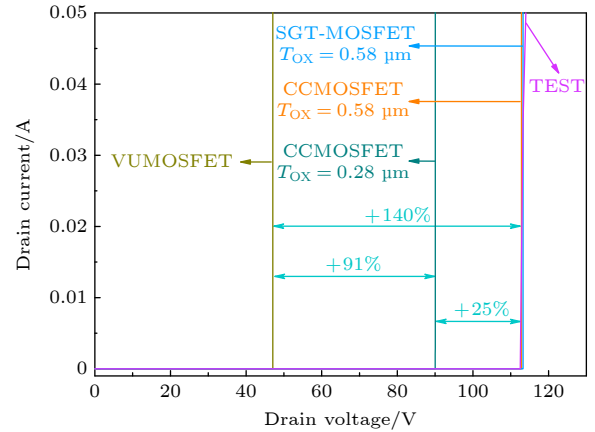


图 4 不同结构击穿曲线对比

Fig. 4. Comparison of breakdown curves of different structures.

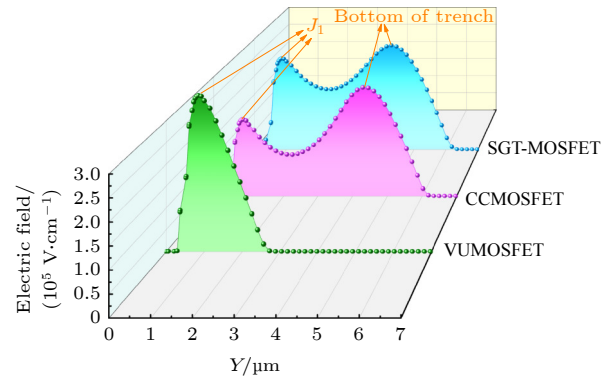


图 5 不同结构电场强度分布图

Fig. 5. The electric field strength distribution diagram of different structures.

为了分析场氧厚度对器件击穿电压、电场均匀性的影响, 沿图 2 中虚线 1—3 截取了 3 种不同结构的电势分布曲线如图 6 所示。与 CCMOSFET 相比, SGT-MOSFET 的场氧更厚, 则聚集于 SGT-MOSFET 沟槽两侧的空穴载流子数目更少, 沟槽间的空穴载流子分布更加均匀。因此 SGT-MOSFET

纵向轴对称线上的电势更高, 击穿电压更大, 电场分布更加均匀.

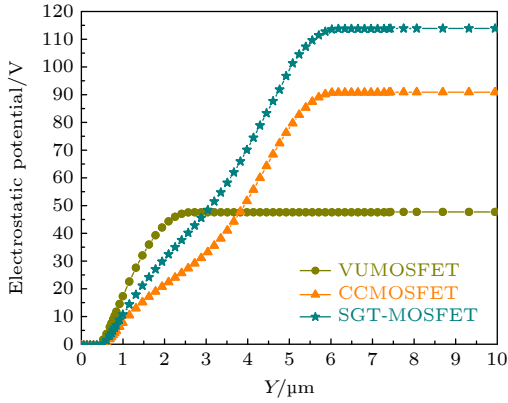


图 6 不同结构电势分布曲线

Fig. 6. The potential distribution curves of different structures.

CCMOSFET、SGT-MOSFET 在不同场氧厚度和台面宽度下的击穿电压如图 7 所示. 在元胞宽度不变的情况下, 台面宽度为 $1.4 \mu\text{m}$ 时, 击穿电压随场氧厚度增大而线性增大; 在台面宽度为 $2.4 \mu\text{m}$ 和 $3.4 \mu\text{m}$ 时, 随场氧厚度增大击穿电压先增大后减小, 并且台面宽度越宽, 击穿电压最大时对应的场氧厚度越薄. 这是由于在 $1.4 \mu\text{m}$ 台面宽度下, 器件体内场板可以充分辅助耗尽 n 漂移区, 场氧厚度的变化对空间电荷区展宽的影响很小, 而场氧厚度的增大会进一步优化电场强度分布, 从而提高器件击穿电压. 在 $2.4 \mu\text{m}$ 和 $3.4 \mu\text{m}$ 较大的台面宽度下, 场氧厚度的增加会进一步削弱体内场板对 n 漂移区的耗尽, 使空间电荷区展宽减小, 击穿电压下降.

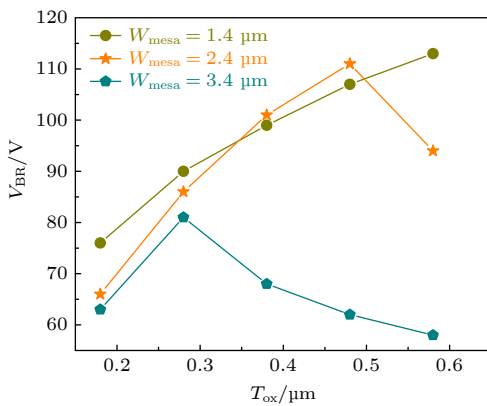


图 7 不同场氧厚度下的击穿电压

Fig. 7. The breakdown voltage under different field oxygen thicknesses.

4 电场解析模型

4.1 电场解析模型的建立

以上分析可知, 场氧厚度和台面宽度对器件击穿电压以及电场强度分布的影响不是独立的, 而与电场强度分布有关的结构参数还包括沟槽深度、元胞宽度、漂移区掺杂浓度等. 参数越多其对电场强度分布影响的关联性越复杂, 因此有必要建立与器件各个结构参数相关的电场解析模型来为器件结构设计提供依据.

如图 8 所示为两个元胞的 SGT-MOSFET 结构示意图, 建立如下坐标系, 以硅表面为 X 轴, 以两个元胞沟槽间漂移区的对称轴为 Y 轴. 图中 W_n 为 $1/2$ 台面宽度, T_{ox} 为屏蔽栅与漂移区间的场氧层厚度, L_n 为沟槽间漂移区的长度, D_p 为 p 基区的深度, W_{PSC} 为空间电荷区在 p 基区的展宽, W_{TSC} 为空间电荷区在沟槽底部的展宽. 将轴对称线上的纵向电场强度划分为 p 基区、沟槽间漂移区和沟槽底部三段分布.

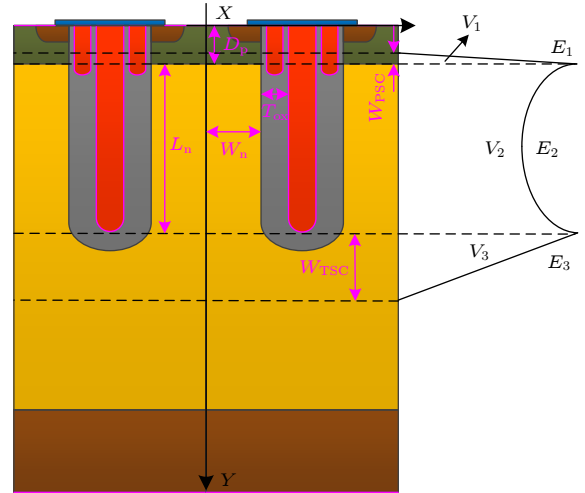


图 8 SGT-MOSFET 结构示意图

Fig. 8. The schematic diagram of SGT-MOSFET.

对于沟槽间漂移区电场强度分布, 假设阻断状态下沟槽间的漂移区完全耗尽, 则有二维泊松方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi(x, y)}{\partial y^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon_{si}}. \quad (1)$$

将 $\varphi(x, y)$ 沿 x 方向泰勒展开并保留前三项为

$$\varphi(x, y) = \varphi(0, y) + \frac{\partial \varphi(0, y)}{\partial x} x + \frac{\partial^2 \varphi(0, y)}{2 \partial x^2} x^2. \quad (2)$$

y 轴为沟槽间漂移区的对称轴, 对称轴上的横向电场强度为零, 则有边界条件

$$\frac{\partial \varphi(0, y)}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

假设 x 方向的场氧层电场强度均匀分布, 则介质交界处电位移矢量的连续性方程为

$$\frac{\partial \varphi(W_n, y)}{\partial x} = \frac{\varphi(W_n + T_{ox}, y) - \varphi(W_n, y)}{KT_{ox}}, \quad (4)$$

其中

$$K = \frac{\varepsilon_{si}}{\varepsilon_{ox}}. \quad (5)$$

由于屏蔽栅与源极相接, 电势为 0, 则有边界条件:

$$\varphi(W_n + T_{ox}, y) = 0. \quad (6)$$

将 (2)—(6) 式代入原泊松方程 (1) 式, 可得:

$$\frac{\partial^2 \varphi(0, y)}{\partial y^2} - \frac{\varphi(0, y)}{T^2} = -\frac{qN_D}{\varepsilon_{si}}, \quad (7)$$

其中

$$T = \sqrt{1/2W_n^2 + KW_nT_{ox}}. \quad (8)$$

假设沟槽间漂移区上承担的电压为 V_2 , 则在 $(0, D_p)$ 和 $(0, L_n)$ 处有边界条件:

$$\varphi(0, D_p) = 0, \quad (9)$$

$$\varphi(x, D_p + L_n) = V_2. \quad (10)$$

由方程 (7) 及边界条件 (9) 和 (10) 式可得 SGT-MOSFET 沟槽间漂移区的电场强度分布表达式 [21]:

$$\begin{aligned} E_2(0, y) = & \frac{V_2}{T} \frac{\cosh[(y - D_p)/T]}{\sinh[(D_p + L_n)/T]} + \frac{qN_D T}{\varepsilon_{si}} \\ & \times \left\{ \frac{\cosh[(L_n - y + 2D_p)/T] - \cosh[(y - D_p)/T]}{\sinh[(D_p + L_n)/T]} \right\} \\ & + \frac{qN_D t}{\varepsilon_{si}} \left\{ \frac{t \cosh \left[\frac{y - D_p}{T} \right]}{T \sinh \left[\frac{D_p + L_n}{T} \right]} - \frac{\cosh \left[\frac{y - D_p}{t} \right]}{\sinh \left[\frac{D_p + L_n}{t} \right]} \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

其中

$$t = \frac{W_n}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

由表达式 (11) 可知, 沟槽间漂移区的电场强度分布与外加漏源电压 V_2 , 台面宽度 W_n , 场氧层厚度 T_{ox} , 沟槽间漂移区长度 L_n , 以及漂移区掺杂浓度 N_d 有关. p 基区和沟槽底部的电场强度分布主要由掺杂浓度决定, 为了简化计算, 取 p 基区为

常掺杂, 即

$$\frac{\partial(0, y)}{\partial y} = -\frac{qN_{A,D}}{\varepsilon_{si}}. \quad (13)$$

将 $y = D_p$ 和 $y = D_p + L_n$ 代入电场强度表达式 (11) 可得:

$$\begin{aligned} E_2(0, D_p) = & \frac{V_2}{T \sinh[(D_p + L_n)/T]} \\ & + \frac{qN_D T}{\varepsilon_{si}} \left[\frac{\cosh[(D_p + L_n)/T] - 1}{\sinh[(D_p + L_n)/T]} \right] \\ & + \frac{qN_D T}{\varepsilon_{si}} \left[\frac{t}{T \sinh[(D_p + L_n)/T]} \right. \\ & \left. - \frac{1}{\sinh[(D_p + L_n)/t]} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} E_2(0, D_p + L_n) = & \frac{V_2}{T} \frac{\cosh(L_n/T)}{\sinh[(D_p + L_n)/T]} \\ & + \frac{qN_D T}{\varepsilon_{si}} \left\{ \frac{\cosh(D_p/T) - \cosh(L_n/T)}{\sinh[(D_p + L_n)/T]} \right\} \\ & + \frac{qN_D T}{\varepsilon_{si}} \left[\frac{t \cosh(L_n/T)}{T \sinh[(D_p + L_n)/T]} - \frac{\cosh(L_n/T)}{\sinh[(D_p + L_n)/t]} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

由 (13)—(15) 式可得 p 基区和沟槽底部的电场强度表达式为

$$E_1(0, y) = \frac{qN_A}{\varepsilon_{si}}(y - D_p) + E_2(0, D_p), \quad (16)$$

$$E_3(0, y) = \frac{qN_D}{\varepsilon_{si}}(D_p + L_n - y) + E_2(0, D_p + L_n). \quad (17)$$

由 (16) 式和 (17) 式可得 p 基区和沟槽底部的空间电荷区展度分别为

$$W_{PSC} = \frac{E_2(0, D_p)\varepsilon_{si}}{qN_A}, \quad (18)$$

$$W_{TSC} = \frac{E_2(0, D_p + L_n)\varepsilon_{si}}{qN_D}. \quad (19)$$

对 p 基区和沟槽底部的电场强度积分可得:

$$V_1 = \frac{1}{2} E_2(0, D_p) W_{PSC} = \frac{E_2^2(0, D_p)\varepsilon_{si}}{2qN_A}, \quad (20)$$

$$V_3 = \frac{1}{2} E_2(0, L_n) W_{TSC} = \frac{E_2^2(0, D_p + L_n)\varepsilon_{si}}{2qN_D}. \quad (21)$$

将 (20) 式和 (21) 式代入方程:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V, \quad (22)$$

可求得

$$V_2 = f_3(V). \quad (23)$$

将 (23) 式代入 (11) 式可得繁杂的沟槽间漂移区的电场强度表达式. 重复 (13)—(17) 式, 可得 p 基区和沟槽底部的电场强度表达式. 最终整个器件的电场强度表达式为

$$\begin{cases} E_1(0, y) = f_5(V), & 0 \leq y < D_p, \\ E_2(0, y) = f_4(V), & D_p \leq y \leq D_p + L_n, \\ E_3(0, y) = f_6(V), & D_p + L_n < y. \end{cases} \quad (24)$$

将表 2 中具体参数值代入表达式 (24), 可得 SGT-MOSFET 在不同电压下电场强度分布的解析结果如图 9 所示, 并与仿真结果进行对比. 可以看出, 50 V 电压下解析结果和仿真结果吻合较好, 而在 113 V 高电压下, 解析模型沟槽底部的电场强

表 2 表达式中的具体参数值

Table 2. Specific parameter values in expressions.

参数	参数值	单位
N_D	1.5×10^{16}	cm^{-3}
N_A	4×10^{16}	cm^{-3}
q	1.602×10^{-19}	C
ϵ_{si}	1.053626×10^{-12}	F/cm
D_p	0.8×10^{-4}	cm
L_n	3.5×10^{-4}	cm
W_n	0.70×10^{-4}	cm
T_{ox}	0.58×10^{-4}	cm
K	3.0512820513	—
T	1.2005×10^{-4}	cm
t	0.49497×10^{-4}	cm

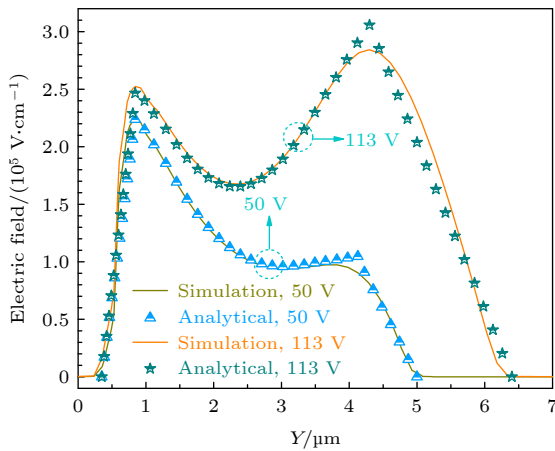


图 9 不同电压下电场解析结果和仿真结果的对比

Fig. 9. Comparison of electric field analysis results and simulation results under different drain-source voltages.

度高于仿真结果, 这是由于在高电压下器件内部已产生雪崩电流, 雪崩产生的电子在正向漏源电压下向漏极移动, 使沟槽底部电场强度降低, 而解析模型并未考虑到雪崩载流子对电场强度分布的影响.

4.2 电场解析模型的修正

考虑上雪崩产生的载流子对电场强度分布的影响, 引入雪崩电流来对电场解析模型进行修正. 器件在 113 V 电压下的漏极电流为 1×10^{-3} A, 此时器件空间电荷区的掺杂浓度为有效掺杂浓度, 需要考虑上雪崩产生的电子和空穴^[22]:

$$E_{\text{ava}}(0, y) = \frac{q}{\epsilon_{\text{si}}} \int N_{\text{eff}}(y) dy, \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} N_{\text{eff}}(y) &= N(y) + p_{\text{sc}} - n_{\text{sc}} \\ &= N(y) + \frac{J_p(y)}{qV_p(y)} - \frac{J_n(y)}{qV_n(y)}, \end{aligned} \quad (26)$$

其中

$$N(y) = \begin{cases} N_A, & 0 \leq y \leq D_p, \\ N_D, & D_p \leq y. \end{cases} \quad (27)$$

电子和空穴有关电场强度的漂移速度表达式如下^[23]:

$$V_n(y) = 1 \times 10^7 \left[1 - \exp \left(-\frac{E_{\text{ava}}(0, y)}{8.2 \times 10^3} \right) \right]. \quad (28)$$

$$V_p(y) = 9 \times 10^6 \left[1 - \exp \left(-\frac{E_{\text{ava}}(0, y)}{2 \times 10^4} \right) \right]. \quad (29)$$

在空间电荷区中电子电流连续性方程如下:

$$dJ_n = J_n a_n(y) dy + J_p a_p(y) dy. \quad (30)$$

总电流密度 J 等于:

$$J = J_n + J_p. \quad (31)$$

电子和空穴有关电场强度的碰撞电离率为

$$a_n(y) = 7.03 \times 10^5 \exp \left(-\frac{1.23 \times 10^6}{E_{\text{ava}}(0, y)} \right), \quad (32)$$

$$a_p(y) = 1.528 \times 10^6 \exp \left(-\frac{2.04 \times 10^6}{E_{\text{ava}}(0, y)} \right). \quad (33)$$

通过求解以上非线性方程组, 最终可得修正后的电场解析表达式为

$$\begin{cases} E_{11}(0, y) = f_{55}(V, J), & 0 \leq y < D_p, \\ E_{22}(0, y) = f_{44}(V, J), & D_p \leq y \leq D_p + L_n, \\ E_{33}(0, y) = f_{66}(V, J), & D_p + L_n < y. \end{cases} \quad (34)$$

将 $V = 113 \text{ V}$, $J = 1 \times 10^{-3} \text{ A}$ 代入 (34) 式, 得到修正后的电场强度解析模型如图 10 所示, 可以看出其与仿真结果符合得较好。

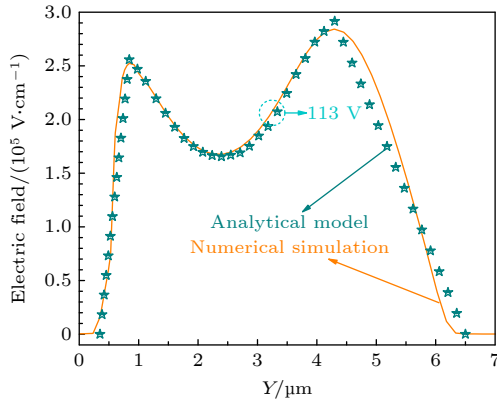


图 10 修正后的电场解析模型
Fig. 10. Revised electric field analytical model.

4.3 参数优化

在 $1.4 \mu\text{m}$ 台面宽度下, 器件击穿电压随场氧厚度增加而线性增大, 说明此时屏蔽栅能够较好的辅助耗尽漂移区. 因此建立了 $1.4 \mu\text{m}$ 台面宽度下不同场氧厚度的电场解析模型, 如图 11 所示. 随着场氧厚度增大, 元胞间漂移区轴对称线上的电场强度分布越加均匀, 在 $0.68 \mu\text{m}$ 场氧厚度下, J_1 结和沟槽底部的电场峰值几乎相等, 达到最优电场强度分布。

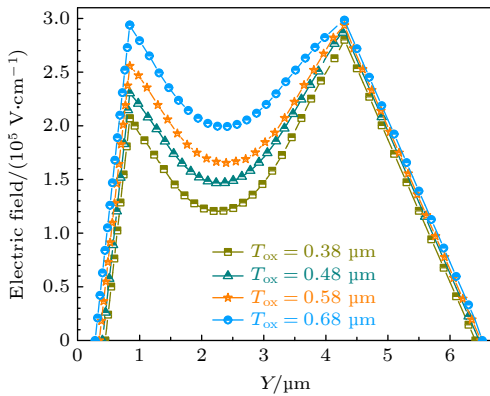


图 11 不同场氧厚度下的电场解析模型
Fig. 11. Analytical model of electric field under different field oxygen thicknesses.

通常通过优值参数来评估器件的性能, 其中优值 FOM_1 是评估器件静态特性的指标, 由 (35) 式定义. 击穿电压 V_{BR} 越高, 导通电阻 R_{on} 越小, 则优值 FOM_1 越大, 代表器件击穿电压和导通电阻折中越好, 器件静态特性越优异。

$$\text{FOM}_1 = \frac{V_{\text{BR}}^2}{R_{\text{on}}}. \quad (35)$$

器件在不同场氧厚度下的 R_{on} 、 V_{BR} 、归一化优值 FOM_1 如图 12 所示. 通态时屏蔽栅极与源极接零电位, 会使电子电流远离靠近屏蔽栅极侧的漂移区. 而随着场氧厚度增大, 电子电流导通面积增大, 因此器件导通电阻降低. 在 $0.68 \mu\text{m}$ 场氧厚度下优值 FOM_1 最大, 表明此时器件的静态特性最佳。

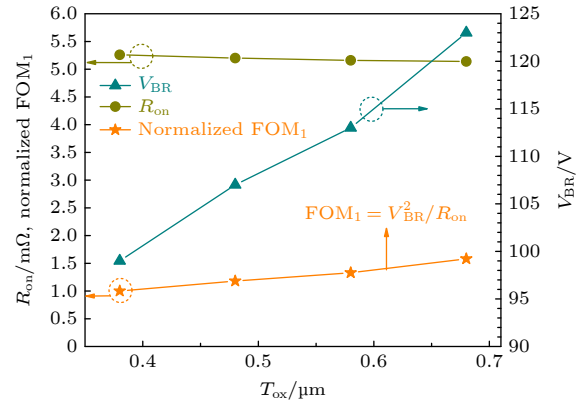


图 12 不同场氧厚度下的 R_{on} 、 V_{BR} 、归一化优值 FOM_1
Fig. 12. R_{on} , V_{BR} , and normalized FOM_1 under different.

优值 FOM_2 是评估器件开关特性的指标, 定义为

$$\text{FOM}_2 = R_{\text{on}} \times Q_g, \quad (36)$$

其中导通电阻 R_{on} 越小, 栅电荷 Q_g 越少, 则优值 FOM_2 越小, 代表器件开关速度越快, 功耗越少, 器件动态特性越优异。

不同场氧厚度下的栅电荷如图 13 所示, 测试条件为 $V_{\text{DD}} = 80 \text{ V}$, $V_{\text{GS}} = 10 \text{ V}$, $I_g = 6.5 \text{ mA}$, $I_d = 13 \text{ A}$. 随着场氧厚度增大, 栅源电容减小, 因此栅源电荷降低. 虽然不同场氧厚度下器件击穿电压不同, 但由于屏蔽栅可以充分辅助耗尽 n 漂移区, 场氧厚度的变化对空间电荷区展宽影响很小, 因此栅漏电荷几乎不变。

器件在不同场氧厚度下的 R_{on} 、栅电荷 Q_g 、优值 FOM_2 如图 14 所示. 在 $0.68 \mu\text{m}$ 场氧厚度下优值 FOM_2 最小, 表明此时器件的动态特性最佳. 相对于图 1 中场氧厚度为 $0.58 \mu\text{m}$ 的 SGT MOSFET 产品, 在优化后的 $0.68 \mu\text{m}$ 场氧厚度下 FOM_1 提升了 18.9%, FOM_2 降低了 8.5%, 因此器件的静动态特性均得到明显改善。

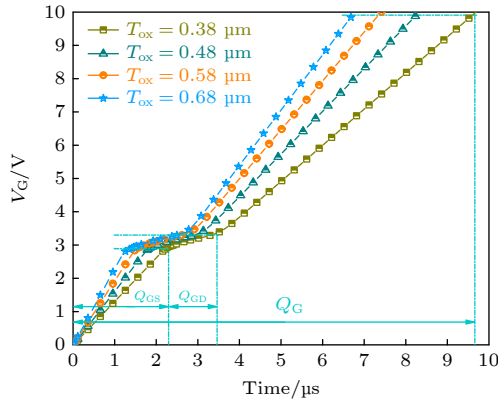


图 13 不同场氧厚度下的栅电荷

Fig. 13. Gate charges under different field oxygen thicknesses.

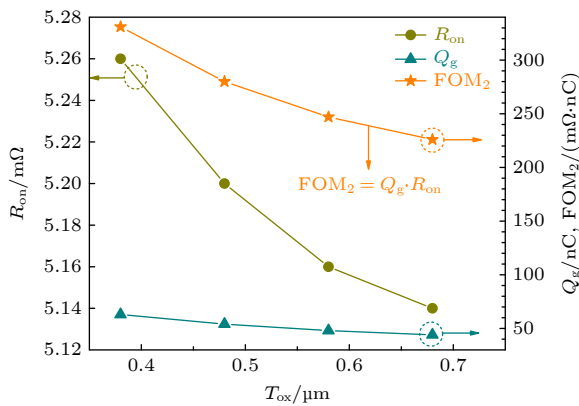
图 14 不同场氧厚度下的 R_{on} 、 Q_g 、优值 FOM_2

Fig. 14. R_{on} , Q_g , and FOM_2 under different field oxygen thickness.

5 结 论

SGT-MOSFET 场氧厚度和台面宽度对器件击穿电压以及电场强度分布的影响不是相互独立的, 参数越多其对电场强度分布影响的关联性越复杂. 本文通过建立与器件各个结构参数相关的电场解析模型, 为器件结构设计提供了理论依据; 并引入雪崩载流子对小电流下的电场解析模型进行了修正, 使得解析结果和仿真结果吻合较好; 通过修正后的电场解析模型提取了最优电场下的场氧厚度. 与原本 $0.58 \mu\text{m}$ 场氧厚度的 SGT MOSFET 产品相比, 在 $0.68 \mu\text{m}$ 最优场氧厚度下器件的优值参

数 FOM_1 提升了 18.9%, FOM_2 降低了 8.5%, 使得器件的静、动态特性均得到明显改善, 从而极大地提升了相应产品的性能.

参考文献

- [1] Nguyen M H, Kwak S 2020 *Electronics* **9** 2068
- [2] Huang A Q 2017 *P. IEEE* **105** 2019
- [3] Krishnan R 2020 *IEEE Ind. Electron. Mag.* **16** 105
- [4] Williams R K, Darwish M N, Blanchard R A, Siemieniec R, Rutter P, Kawaguchi Y 2017 *IEEE. T. Electron. Dev.* **64** 692
- [5] Xi J, Wang J, Lu J, Chen J, Xin Y, Li Z, Tu C, Shen Z J 2018 *Microelectron. Reliab.* **88–90** 593
- [6] Park C, Havanur S, Shibib A, Terrill K 2016 *Proceedings of the 28th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs Prague, Czech Republic, June 12–16, 2016* p387
- [7] Wang Y, Hu H F, Jiao W 2012 *IEEE. T. Electron. Dev.* **59** 3037
- [8] Tian Y, Yang Z, Xu Z, Liu S, Sun W F, Shi L, Zhu Y, Ye P, Zhou J 2018 *Superlattice. Microst.* **116** 151
- [9] Su L, Wang C L, Yang W H, An J 2022 *Microelectron. Reliab.* **139** 114822
- [10] Tong C F, Mawby P A, Covington J A 2009 *13th European Conference on Power Electronics and Applications Barcelona, Spain, September 8–10, 2009* 10939294
- [11] Wang Y, Yu C H, Hu H F, Dou Z 2013 *IET. Power. Electron.* **7** 2964
- [12] Wang Y, Lan H, Dou Z, Hu H F 2014 *IET. Power. Electron.* **7** 2030
- [13] Deng S, Hossain Z, Taniguchi T 2017 *IEEE. T. Electron. Dev.* **64** 735
- [14] Wang W, Ning R, Shen Z J 2017 *IEEE. Electr. Device. L.* **38** 1055
- [15] Chien F T, Wang Z Z, Lin C L, Kang T K, Chen C W, Chiu H C 2020 *Micromachines* **11** 504
- [16] Chen R, Wang L, Jiu N, Zhang H, Guo, M 2020 *Electronics* **9** 745
- [17] Wang Z K, Qiao M, Fang D, Wang R D, Qi Z, Li Z J, Zhang B 2020 *IEEE. Electr. Device. L.* **41** 749
- [18] Su L, Wang C L, Yang W H, Zhang C 2023 *Microelectron. Reliab.* **143** 114950
- [19] Zhang W T, Pu S, Lai C L, Ye L, Cheng S, Zhang S, He B, Wang Z, Luo X, Qiao M 2018 *Proceedings of the 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs Chicago, IL, USA, May 13–17, 2018* p475
- [20] Zhang W T, Ye L, Fang D, Qiao M, Xiao K, He B Y, Li Z J, Zhang B 2019 *IEEE. T. Electron. Dev.* **66** 1416
- [21] Zhang W T, Zhang B, Qiao M, Wu L J, Mao K, Li Z J 2014 *IEEE. T. Electron. Dev.* **61** 518
- [22] Oetjen J, Jungblut R, Kuhlmann U, Arkenau J, Sittig R 2000 *Solid. State. Electronic.* **44** 117
- [23] Jacoboni C, Canali C, Ottaviani G, Quaranta A A 1977 *Solid. State. Electronic.* **20** 77

Analytically modeling electric field of shielded gate trench metal-oxide-semiconductor field effect transistor^{*}

Su Le Wang Cai-Lin[†] Yang Wu-Hua Liang Xiao-Gang Zhang Chao

(*Department of Electronic and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

(Received 7 April 2023; revised manuscript received 18 April 2023)

Abstract

Shielded gate trench metal-oxide-semiconductor field effect transistor (SGT-MOSFET) introduces a longitudinal shielding gate connected to the source inside the body, which can assist in depleting the drift region. Its principle of withstanding voltage is different from that of the vertical U-groove MOSFET (VUMOSFET). The SGT-MOSFET will generate two electric field peaks inside the body, which will further optimize the electric field strength distribution of the device and increase the breakdown voltage of the device. Therefore, SGT-MOSFET has not only the advantages of low conduction loss of CCMOSFET, but also lower switching loss. The effects of structural parameters such as the width of the mesa, the thickness of the field oxygen, the depth of the trench and the doping concentration on the electric field strength distribution of SGT-MOSFET are not independent of each other. The more the parameters, the more complex the correlation of their effects on the electric field strength distribution is. In this paper, we take 110V SGT-MOSFET as a research object. Through numerical simulation, theoretical analysis and analytical modeling, the principle of withstanding voltage for different structures and the correlation between structural parameters and electric field strength distribution are studied. The analytical model of the electric field related to various structural parameters of the device is established, which provides a theoretical basis for the design of the device structure. The analytical model of electric field under low current is modified by introducing avalanche carriers, so that the modified analytical results can better match the simulation results. Through the modified electric field analysis model, the field oxygen thickness in an optimal electric field is $0.68\ \mu\text{m}$. Comparing with the product of SGT-MOSFET with $0.58\ \mu\text{m}$ field oxygen thickness, at the optimal field oxygen thickness of $0.68\ \mu\text{m}$, the on-resistance of the device is reduced because the on-area of the device is increased; the electric field distribution is more uniform, so the device breakdown voltage increases; the gate-source capacitance decreases and the gate-drain capacitance is almost no change, so the gate-source charge decreases and the gate-drain charge is almost no change, while the total gate charge decreases. As a result, the optimal value parameter FOM_1 of the device is increased by 18.9%, and the optimal value parameter FOM_2 is reduced by 8.5%. Therefore, the static and dynamic characteristics of the device are significantly promoted, and the performance of the corresponding products is greatly improved.

Keywords: SGT-MOSFET, electric field analytical model, avalanche carrier, field oxygen thickness

PACS: 85.30.Mn, 85.30.Pq, 85.30.Tv

DOI: 10.7498/aps.72.20230550

^{*} Project supported by the “Two Chain” Integration Key Project of Shaanxi Province, China (Grant No. 2021LLRH-02), the Scientific Research Program Project of Shaanxi Provincial Education Department of China (Grant No. 22JK0484), and the Natural Science Basic Research Program of Science and Technology Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2023-JC-QN-0764).

[†] Corresponding author. E-mail: wangcailin8511@xaut.edu.cn

SGT-MOSFET电场解析模型的建立

苏乐 王彩琳 杨武华 梁晓刚 张超

Analytically modeling electric field of shielded gate trench metal-oxide-semiconductor field effect transistor

Su Le Wang Cai-Lin Yang Wu-Hua Liang Xiao-Gang Zhang Chao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 148501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230550

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230550>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一个圆柱形双栅场效应晶体管的物理模型

A physical model of cylindrical surrounding double-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2021, 70(15): 157302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202156>

U型槽刻蚀工艺对GaN垂直沟槽型金属-氧化物-半导体场效应晶体管电学特性的影响

Effect of U-shape trench etching process on electrical properties of GaN vertical trench metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191850>

短沟道金属-氧化物半导体场效应晶体管的散粒噪声模型

Shot noise model of the short channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(17): 177102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200497>

纳米尺度金属-氧化物半导体场效应晶体管沟道热噪声模型

A channel thermal noise model of nanoscaled metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(5): 057101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191512>

一种基于BSIM4的屏蔽栅沟槽MOSFET紧凑型模型

A compact model of shield-gate trench MOSFET based on BSIM4

物理学报. 2020, 69(17): 177103 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200359>

硅/锗基场效应晶体管沟道中载流子散射机制研究进展

Progress of the study on carrier scattering mechanisms of silicon/germanium field effect transistors

物理学报. 2019, 68(16): 167301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191146>