一种能够改善鲁棒性的新型 4H-SiC ESD 防护器件*

常帅军[1)] 马海伦[1)] 李浩[2)] 欧树基[2)] 郭建飞[2)] 钟鸣浩[2)] 刘莉[1)2)†

1) (西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体国家重点实验室, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学广州研究院, 广州 510555)

(2022 年 5 月 4 日收到; 2022 年 5 月 30 日收到修改稿)

2020 年, 韩国学者以 4H-SiC 材料为基底提出了一种新型 ESD 防护器件 HHFGNMOS(high holding voltage floating gate NMOSFET), 此结构显著改善了 4H-SiC GGNMOS(grounded-gate NMOSFET) 因 SiC 材料特性导致的剧烈回滞现象. 但是在 HHFGNMOS 结构中仍存在电流分布过于密集的问题. 在本文中首次将 comb-like 结构用于 HHFGNMOS 防护器件, 将器件的漏区底部进行梳型改造, 充分利用电流集边效应使电流分布变得均匀, 并通过 TCAD 仿真给出了 Comb-like 结构的设计变量对结构性能的影响. 基于 4H-SiC 的 GGNMOS, HHFGNMOS, Comb-like HHFGNMOS 在 TLP 脉冲下的瞬态仿真结果显示, comb-like HHFGNMOS 的二次失效电流 I_{T2} 相比 GGNMOS 以及 HHFGNMOS 由 17 A 提高到 22 A, 提高了 29%; 此外 comb-like HHFGNMOS 回滞相比 GGNMOS 及 HHFGNMOS 减小了 55.2% 和 5%. 因此在面积不变、工艺相兼容的情况下较大程度改善了器件的鲁棒性, 减小了回滞效应.

关键词: HHFGNMOS, Comb-like HHFGNMOS, 4H-SiC, 电流密度分布

PACS: 85.30.De **DOI:** 10.7498/aps.71.20220879

1 引 言

随着 CMOS IC 中短栅长、薄栅氧化层等先进工艺的发展, 在提高集成电路性能和集成度的同时, 内部电路在静电放电时更易遭受破坏, 因此改善 ESD 防护器件的鲁棒性已经成为了研究的热点问题之一[1]. 宽禁带材料 4H-SiC 因其高温、大功率和高压条件下优异的材料性能, 能够克服硅材料的限制, 更适用于航空航天、汽车等高压大功率器件领域. 在 ESD 器件应用方面, 尽管 4H-SiC 相比 Si 有着很多的优势, 但目前对基于 SiC 材料的 ESD 防护器件的研究还很少[1]. 由于 4H-SiC 材料的临界电场 ($E_c = 2.4$ MV/cm) 大约为 Si 材料 ($E_c = 0.25$ MV/cm) 的十倍, 且载流子迁移率低, 空穴迁移率不足 Si 材料空穴迁移率的四分之一[2], 这使得传统 4H-SiC GGNMOS 器件的触发电压非常大, 造成回滞效应相比硅基器件剧烈. 近年, 由韩国学者 Do 等[3] 提出了基于 4H-SiC 材料的新型 HHFGNMOS 结构, 该结构采用常见于 SCR 结构的分段结构以及栅极耦合技术[4,5]. 在同一工艺流片后, TLP 测试结果显示 HHFGNMOS 结构的触发电压 V_{T1} 由 GGNMOS 的 250 V 减小至 205 V, 维持电压 V_H 由 74 V 提高至 122 V, 显著改善了 4H-SiC 材料本身所带来的剧烈回滞现象. 但因电流集边效应 HHFGNMOS 与 GGNMOS 的 ESD 电流主要通过靠近栅极的漏区内侧泄放, 造成电流分布过于密集.

* 陕西省重点研发计划 (批准号: B020250023) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuli@mail.xidian.edu.cn

© 2022 中国物理学会 Chinese Physical Society

据此, 本文在 4H-SiC HHFGNMOS 基础上对 MOS 管的漏区的底部进行改造, 将其改为梳型 (comb-like) 结构, 并利用 TCAD 软件仿真, 结果显示采用梳型结构后明显的改善了漏区内侧的电流分布问题, 并且在合理的参数设置下, comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 较 4H-SiC HHFGNMOS 的二次失效电流 I_{T2} 提升 5 A, 维持电压 V_H 增大 8 V, 从而在面积不变, 工艺相兼容的条件下明显的改善了结构性能.

2 一种新型 Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS ESD 防护器件

众所周知, GGNMOS 是一种应用十分广泛的 ESD 结构, 与 CMOS 工艺兼容, 其结构如图 1(a) 所示, 无论是基于 SiC 材料还是 Si 材料, 在正常情

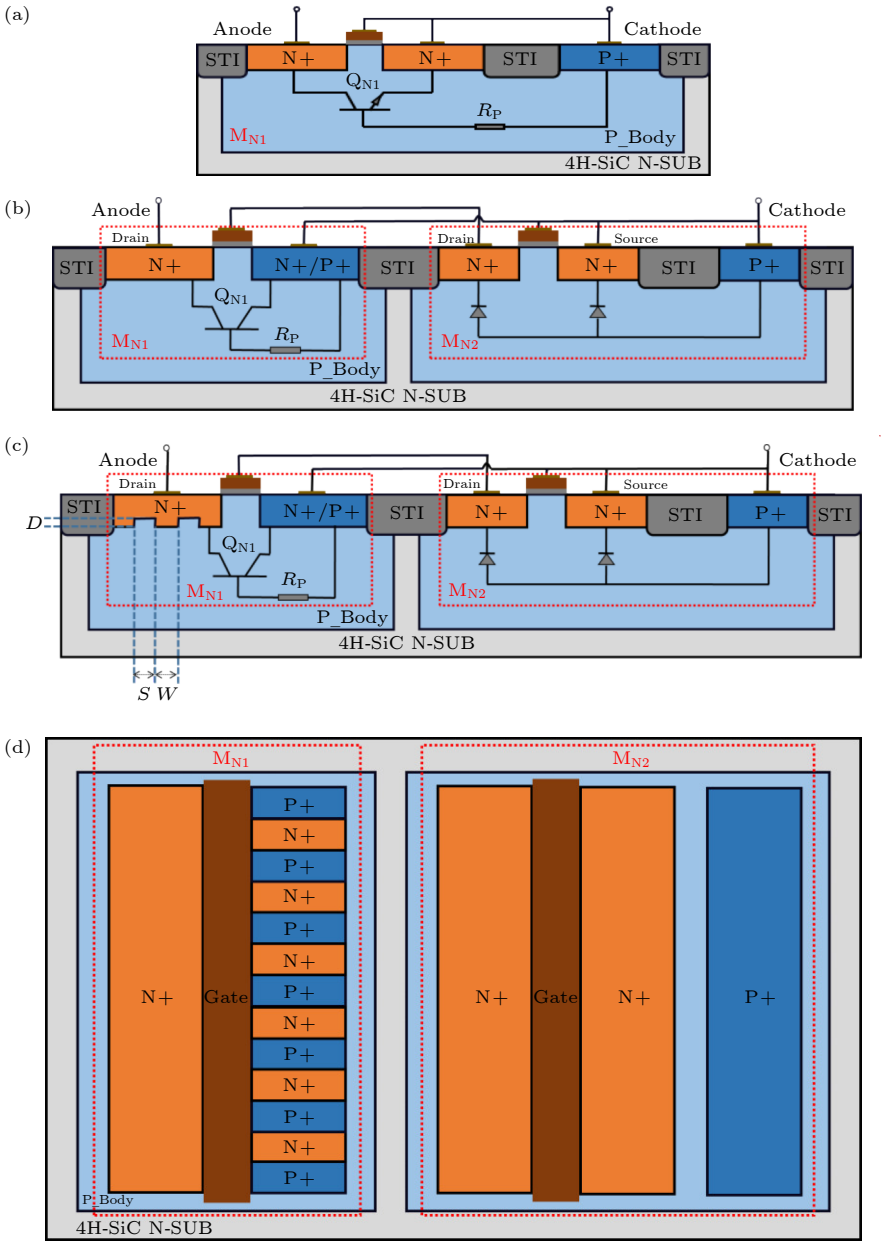

图 1 本文中所涉及到的 4H-SiC ESD 防护器件结构 (a) 4H-SiC GGNMOS (grounded-gate NMOS) 结构; (b) 4H-SiC HHFGNMOS (high holding voltage floating gate NMOSFET) 结构; (c) comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 结构; (d) comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 俯视图

Fig. 1. 4H-SiC ESD protection device structure involved in this paper: (a) 4H-SiC GGNMOS (grounded gate NMOS) structure; (b) 4H-SiC HHFGNMOS (high holding voltage floating gate nMOSFET) structure; (c) comb-like 4H-SiC HHFGNMOS structure; (d) comb-like 4H-SiC HHFGNMOS top view.

况下, 由于 M_{N1} 的反向结高势垒的作用, 器件不工作. 当 ESD 正脉冲作用于阳极时, Drain/P_Body PN 结反向击穿, 形成的空穴电流注入 P_Body, 当 Rp 压降超过 0.7 V 时, 寄生三极管 Q_{N1} 导通, 泄放 ESD 电流, 以此达到保护芯片的目的. 然而传统 GGNMOS 结构并未改善基底材料为 4H-SiC 时所带来的剧烈回滞现象, 因此无法满足 ESD 器件日趋缩小的设计窗口.

图 1(b) 是韩国学者 Do 等于 2020 年提出的 4H-SiC HHFGNMOS 结构, 该结构由两个 NMOS-FET 组成, 分别标记为为 M_{N1} 和 M_{N2}. M_{N1} 漏极连接到阳极, M_{N1} 的栅极与 M_{N2} 的漏极相连, M_{N1} 的源极及 P_Body 电极与 M_{N2} 的栅极、源极、P_Body 电极共同接至阴极. 在正常工作情况下, HHFGNMOS 由于 M_{N1} 的反向结高势垒的作用, 该器件不工作. 当 ESD 正脉冲作用于阳极时, M_{N1} 的 Drain/P_Body PN 结发生雪崩击穿, 产生的空穴电流驱动 M_{N1} 寄生三极管 Q_{N1} 导通以泄放 ESD 电流. M_{N1} 的栅极连接到 M_{N2} 的反向结, 且 M_{N1} 的栅极与漏区存在寄生电容, 由于栅极耦合效应在 ESD 正脉冲到达阳极时, M_{N1} 栅极形成一定的栅压, 增强了 Drain/P_Body PN 结的反向场强, 使得更早发生雪崩击穿, 降低了 V_{T1}, 另一方面, M_{N1} P+面积的减少减小了流经 P_Body 区域的空穴电流, 有助于 Q_{N1} 的正向偏置, 进一步减小了 V_{T1}[6,7]. M_{N1} 的源区采取分段结构, 将 N+/P+ 相互嵌套, 减小源区 N+有源区面积, 器件导通时减小了寄生三极管的发射极注入效率, 由文献[1] 所知, 寄生 npn 电流增益:

$$\beta = \frac{I_c}{I_b} = \frac{I_{oc}}{I_{oe}} = \frac{\gamma\alpha_T}{1-\gamma\alpha_T}, \tag{1}$$

其中 γ 和 α_T 分别为寄生 npn 管的发射极注入效率和基区输运系数;

当 γ 减小, 电流增益 β 减小, 而 β 减小就会影响到寄生 npn 管 Q_{N1} 集电极电流 I_c 的减小:

$$I_c = \frac{\beta I_s}{Q_b}\left[\exp\left(\frac{V_{bs}}{V_T}\right) - \exp\left(\frac{V_{bd}}{V_T}\right)\right], \tag{2}$$

其中 I_S 为理想饱和电流; Q_b 为基区电荷系数; V_T 为热电压.

当 I_c 减小时, 维持电压增大. 根据分析结果 HHFGNMOS 结构性能出色, 但仍存在因电流集边效应使得 ESD 电流主要从漏区内侧泄放到阴极的问题, 导致电流分布比较密集, ESD 脉冲引起的自加热效应更集中, 更容易造成器件热失效.

comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 结构与 4H-SiC HHFGNMOS 主要工作机理相同, 但在 HHFGNMOS 的基础上将漏区改为 comb-like 结构, 该结构在保持 HHFGNMOS 结构优点的同时, 提升了漏区凹处电势, 对原有寄生 NPN 晶体管 Q_{N1} 的电流集边效应进行改进, 利用了电流集边效应[8], 降低漏区内侧的电流密度, 使得电流分布变得均匀, 同时维持电压小幅度增大, 减小因 SiC 材料特性所带来的的剧烈回滞现象, 提高器件的鲁棒性.

3 TCAD 仿真结果分析与讨论

3.1 TLP(传输线) 脉冲瞬态仿真测试结果

TLP 脉冲是具有一定上升沿和脉冲宽度的电流脉冲, 广泛应用于对 ESD 器件的性能测试[9], 不同的脉冲宽度可以模拟不同的静电事件, 本文通过 10 ns 上升沿、100 ns 脉冲宽度的 TLP 脉冲模拟 HBM 静电事件对三种器件结构进行瞬态仿真测试. 在仿真中, comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 与 4H-SiC HHFGNMOS 尺寸保持相同, 源极分段部分为 13 段, 每段宽度相同. 所有器件栅长均为 2 μm, 掺杂区宽度均为 200 μm. 4H-SiC GGNMOS 长为 45 μm, comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 与 4H-SiC HHFGNMOS 长为 72 μm. 此外, comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 结构中 $W = 1$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.1$ μm. 表 1 给出了仿真过程中所使用的器件结构参数.

表 1 comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 结构参数
Table 1. structural parameters of comb-like 4H-SiC HHFGNMOS.

Layer	Junction depth/μm	Doping concentration/cm^{-3}
N+Implant	0.2	2.5×10^{19}
P+Implant	0.2	2×10^{19}
P_Body	0.7	5×10^{18}
N_Epi	13	5×10^{15}

仿真过程中所采用的物理模型包括 analytic, fldmob 迁移率模型, Selberherr 电离模型, bgn 禁带变窄模型, auger, srh 复合模型等. 图 2 为以上三种基于 4H-SiC 材料器件的 TLP I-V 特性曲线, 插图为 TLP 脉冲电路原理图. 其中 GGNMOS 的

触发电压、维持电压、二次失效电流分别为 250 V, 78 V, 17 A 与文献 [3] 基本吻合, HHFGNMOS 的触发电压、维持电压、二次失效电流分别为 202 V, 118 V, 17 A 与文献 [3] 中 205 V, 122 V, 17 A 基本吻合, GGNMOS, HHFGNMOS 泄漏电流为 1×10^{-8} A 与文献基本吻合, 说明仿真采用的物理和结构模型是合理的.

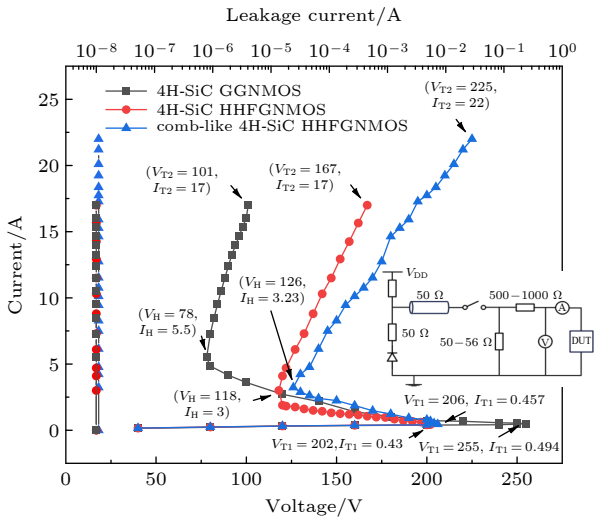

图 2 基于 4H-SiC 的 GGNMOS, HHFGNMOS, Comb-Like HHFGNMOS 三种结构的 TLP I-V 仿真特性曲线

Fig. 2. TLP I-V simulation characteristic curves of GGNMOS, HHFGNMOS and comb-like HHFGNMOS based on 4H-SiC.

据前分析, 4H-SiC HHFGNMOS 结构相比于 4H-SiC GGNMOS, 大大减小了回滞现象, 但仍存在电流分布过于密集导致自加热效应比较严重的问题. 图 3 给出了 comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 与 4H-SiC HHFGNMOS 器件在同一 TLP 脉冲瞬态仿真时的电流密度分布图, 图中均选取阳极电流为 85 mA/um 时刻的电流密度分布, 以确保器件处于已触发状态下, 由此可见 comb-like 结构利用电流集边效应有效地降低了漏区内侧的电流密度, 提高了电流分布的均匀性. 图 3 仿真的同时对 comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 与 4H-SiC HHFGNMOS 晶格温度在 TLP 脉冲测试期间的变化进行了提取, 如图 4 所示, 从图 4 可以明显地看出, 相比于 4H-SiC HHFGNMOS 结构, comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 结构的晶格温度得到有效降低, 在 4H-SiC HHFGNMOS 达到二次击穿点时, 晶格温度由熔点 2073 K 降至 1872 K. 结合图 3 可以看到, 由于 comb-like 结构改善了电流分布, 减轻了电流聚集导致的自加热效应, 使二次失效电流由 17 A 提升到 22 A; 同时一定程度上提升了维持电压, 使得 V_H 由 118 V 提高到 126 V, 整体上较大程度改善了器件的性能.

3.2 Comb-like 结构的设计变量对电流分布的影响研究

如图 1(c) 所示, W(width), S(spacing), D(depth) 是 Comb-like 结构性能的影响参数, 当 $W=1$ μm, $S=1$ μm, $D=0.1$ μm 时, 如图 2 和图 3 所示 Comb-like 结构较为显著的改善了 HHFGNMOS 结构鲁棒性, 现依次改变 W, S, D 值探究各参数的影响.

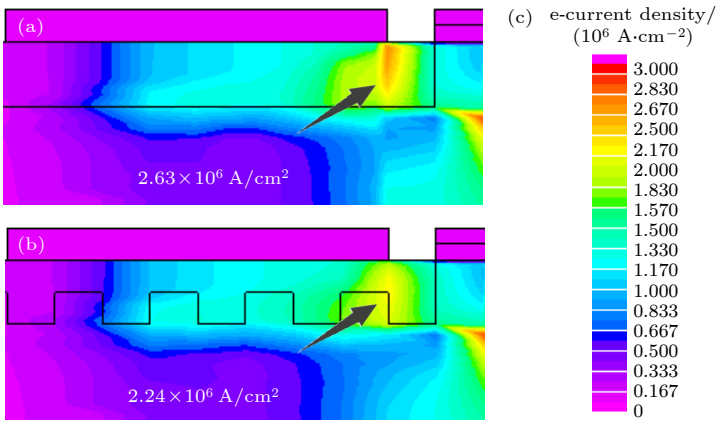

图 3 4H-SiC HHFGNMOS 和 comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 漏区电流密度分布 (a) 4H-SiC HHFGNMOS 漏区电流密度分布; (b) comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 漏区电流密度分布 ($W=1$ μm, $S=1$ μm, $D=0.1$ μm); (c) 电流密度梯度图

Fig. 3. Drain current density distribution of 4H-SiC HHFGNMOS and comb-like 4H-SiC HHFGNMOS: (a) Drain current density distribution of 4H-SiC HHFGNMOS; (b) drain current density distribution of comb-like 4H-SiC HHFGNMOS ($W=1$ μm, $S=1$ μm, $D=0.1$ μm).

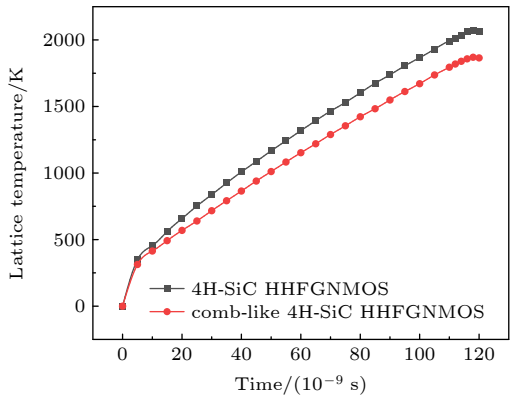

图4 Comb-Like4H-SiCHHFGNMOS 与4H-SiCHHFGNMOS 相同应力下晶格温度曲线

Fig. 4. Lattice temperature curve of Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS and 4H-SiC HHFGNMOS under the same stress.

图 5 给出了 Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 在 $W = 1$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.1$ μm 的基础上依次改变 W, S, D 时的漏区电流密度分布, 图中均选取阳极电流为 85 mA/μm 时刻的电流密度分布, 与图 3 提取电流密度分布时的电学特性条件保持一致. 图 5(a) 和图 5(b) 分别是 $D = 0.05$ μm, 0.15 μm 及 W 和 S 不变时的电流密度分布, 由图 5(a) 可知 $D = 0.05$ μm 时减轻了漏区内侧的电流集边现象, 但改善程度较小, 这是因为 D 较小时 comb-like 结构的凹处电势提升不明显, 不能更有效地利用电流集边效应; 由图 5(b) 可知, 此时也显著减轻了电流集边效应, 但此时漏区面积的减少导致漏区电阻相对图 3(b) 时增大更加明显, 更易发生热损伤, 不能更好的改善 HHFGNMOS 结构鲁棒性. 图 5(c) 和图 5(d) 分别是 $S = 0.5$, 2 μm 及 W 和 D 不变时的电流密度分布, 由图 5(c) 可知 S 较小时, 因相邻的凸处距离过近, 不利于电流的均匀分布, 削弱了 comb-like 结构改善效果; 而在图 5(d) 中 S 较大时, 反而会加剧漏区内测的电流集边, 这是因为当 S 过大时, 凸处的电势增大也很明显, 导致无法利用电流集边效应, 反而因为凹处电势的提升, 导致漏区内侧的电流集边效应更加剧烈. 图 5(e) 和图 5(f) 分别是 $W = 0.5$, 2 μm 及 S 和 D 不变时的电流密度分布, 由图 5(e) 可知 $W = 0.5$ μm 时电流分布更加密集, 这时因为 W 较小, S 相对于 W 过大, 导致凸处电势相对较大, 同时凹处电势的提升, 使得电流集边非常严重, 此时 Comb-like 结构有着较强的负面作用; 当 $W = 2$ μm 时, 此时因为 W 过大导致凹处相对凸处电势提升不明显, 使得改善效果不佳。

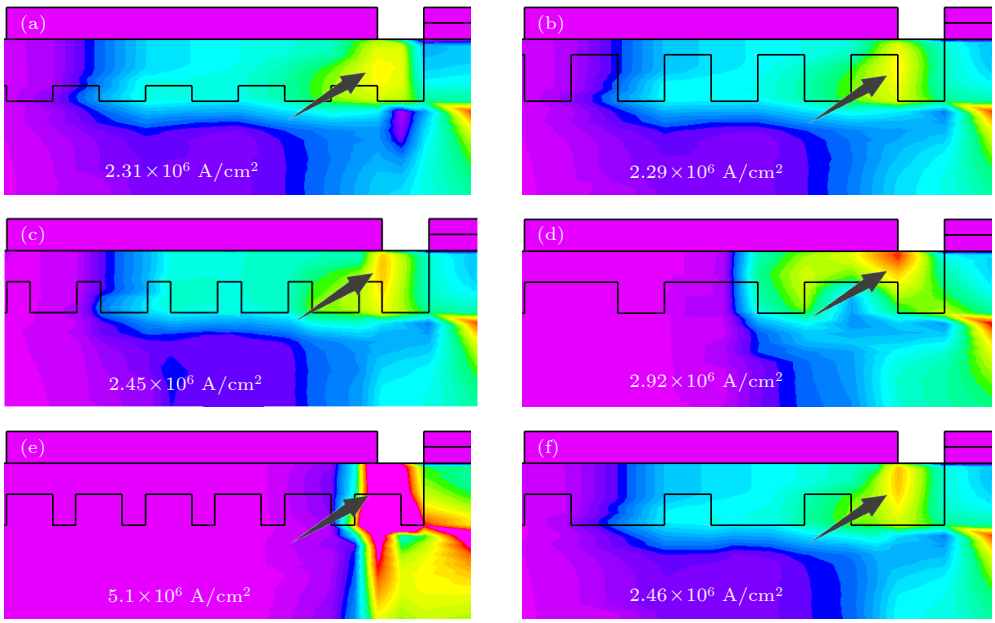

图 5 Comb-like 4H-SiC HFGNMOS 结构不同设计变量时漏区电流密度分布 (a) $W = 1$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.05$ μm; (b) $W = 1$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.15$ μm; (c) $W = 1$ μm, $S = 0.5$ μm, $D = 0.1$ μm; (d) $W = 1$ μm, $S = 2$ μm, $D = 0.1$ μm; (e) $W = 0.5$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.1$ μm; (f) $W = 2$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.1$ μm

Fig. 5. Drain current density distribution of Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS structure under different design variables: (a) $W = 1$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.05$ μm; (b) $W = 1$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.15$ μm; (c) $W = 1$ μm, $S = 0.5$ μm, $D = 0.1$ μm; (d) $W = 1$ μm, $S = 2$ μm, $D = 0.1$ μm; (e) $W = 0.5$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.1$ μm; (f) $W = 2$ μm, $S = 1$ μm, $D = 0.1$ μm.

因此, 不合适的 W, S, D 取值有时会起到负面作用, 使得电流分布更加密集, 器件设计时应进行多次仿真, 确定合适的 W(width), S(spacing), D(depth) 值. 理想的 comb-like 结构使电流的分布更加均匀, 有利于提高器件鲁棒性; 同时小幅度增大维持电压, 改善 4H-SiC 传统 ESD 器件的剧烈回滞现象.

4 总 结

本文通过利用 TCAD 仿真软件对 Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 结构进行研究, 采用 comb-like 结构对 4H-SiC HHFGNMOS 进行了优化改良, 利用电流集边效应, 降低原本因为电流集边效应导致的漏极内侧较大的电流密度, 使得电流分布更加均匀, 与此同时, 该结构一定程度增大了泄漏电流, 使得器件静态功耗变大. 经过仿真发现, 在同一应力下, Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 电流密度分布明显更加均匀, 最大晶格温度由 4H-SiC 熔点 2073 K 降至 1872 K, 二次失效电流 I_{T2} 由 17 A 提升至 22 A, 提高了 29%, 维持电压 V_H 由 118 V 提升至 126 V, 提高了 6.7%, 触发电压 V_{T1} 微弱增加, 此外 Comb-like 4H-SiC HHFGNMOS 的回滞与 4H-SiC GGNMOS 及 4H-SiC HHFGNMOS 相比减小了 55.2% 和 5%. 在面积不变、工艺相兼容的情况下较大程度改善了器件的鲁棒性, 减小了回滞效应.

参考文献

[1] Ameraskera A, Duvvury C 2002 *ESD in silicon integrated circuits* (2nd Ed.) (New York: John Wiley & Sons) pp56–341

[2] Wei J, Liu S, Zhang X, Sun W, Huang A Q 2020 *IEEE Trans. Power Electron* **35** 11299

[3] Do K I, Won J I, Koo Y S 2020 *IEEE Trans. Power Electron* **36** 4921

[4] Do K I, Lee B S, Koo Y S 2018 *IEEE Electron Device Lett* **40** 283

[5] Duvvury C, Diaz C H 1992 *Reliability Physics Symposium 1992 30th Annual Proceedings., International* San Diego, CA, USA, March 31–April 2, 1992 141

[6] Ker M D, Chen T Y 2003 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **50** 1050

[7] Won J I, Jung J W, Yang I S, Koo Y S 2011 *Electron. Lett.* **47** 1072

[8] Lin H S, Shi L C 2002 *Chin. J. Electron.* **25** 209

[9] Wang A Z H 2002 *On-Chip ESD Protection for Integrated Circuits: An IC Design Perspective* (Kluwer Academic Publishers) pp24–26

A novel 4H-SiC ESD protection device with improved robustness*

Chang Shuai-Jun [1)] Ma Hai-Lun [1)] Li Hao [2)] Ou Shu-Ji [2)] Guo Jian-Fei [2)]
Zhong Ming-Hao [2)] Liu Li [1)2)†]

1) (*State Key Laboratory of wide band gap semiconductors*, *School of microelectronics*, *Xidian University*, *Xi'an* 710071, *China*)

2) (*Guangzhou Research Institute of Xidian University*, *Guangzhou* 510555, *China*)

(Received 4 May 2022; revised manuscript received 30 May 2022)

Abstract

In 2020, Korean scholars proposed a new electrotatic discharge (ESD) protection device HHFGNMOS(high holding voltage floating gate nMOSFET) based on 4H-SiC material, which can significantly improve the severe snapback phenomenon of 4H-SiC GGNMOS due to the characteristics of SiC material. However, there still exists a problem that the current distribution is too dense in the HHFGNMOS structure. In this work, the comb-like structure is used for the HHFGNMOS protection device for the first time. The bottom of the drain region of the device is comb transformed, and the current distribution is made uniform by making full use of the current edge effect. The influence of design variables of comb-like structure on structure performance is given by TCAD simulation. The transient simulation results of GGNMOS, HHFGNMOS and comb-like HHFGNMOS based on 4H-SiC under TLP pulse show that the secondary failure current I_{T2} of comb-like HHFGNMOS increases from 17 to 22 A i.e. by 29%, compared with that of GGNMOS and HHFGNMOS. In addition, the comb-like HHFGNMOS snapback is reduced by 55.2% and 5% compared with GGNMOS snapback and HHFGNMOS snapback, respectively. Therefore, the robustness of the device is greatly improved and the snapback effect is reduced under the condition of constant area and compatible process.

Keywords: HHFGNMOS, comb-like HHFGNMOS, 4H-SiC, current density distribution

PACS: 85.30.De **DOI:** 10.7498/aps.71.20220879

* Project supported by the Key R & D Projects in Shaanxi Province, China (Grant No. B020250023).

† Corresponding author. E-mail: liuli@mail.xidian.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

一种能够改善鲁棒性的新型4H-SiC ESD防护器件

常帅军 马海伦 李浩 欧树基 郭建飞 钟鸣浩 刘莉

A novel 4H-SiC ESD protection device with improved robustness

Chang Shuai-Jun Ma Hai-Lun Li Hao Ou Shu-Ji Guo Jian-Fei Zhong Ming-Hao Liu Li

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 71, 198501 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220879

在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.71.20220879

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

Ti, N共掺杂4H-SiC复合增强缓冲层生长及其对PiN二极管正向性能稳定性的改善

Growth of 4H-SiC recombination-enhancing buffer layer with Ti and N co-doping and improvement of forward voltage stability of PiN diodes

物理学报. 2021, 70(3): 037102 https://doi.org/10.7498/aps.70.20200921

基于蒙特卡罗方法的4H-SiC(0001)面聚并台阶形貌演化机理

Formation of step bunching on 4H-SiC (0001) surfaces based on kinetic Monte Carlo method

物理学报. 2019, 68(7): 078101 https://doi.org/10.7498/aps.68.20182067

反场构型平面薄膜电爆炸等离子体电流通道

Current channel in plasma of inverse exploding planar foils

物理学报. 2022, 71(3): 035205 https://doi.org/10.7498/aps.71.20211495

非钳位感性开关测试下双沟槽4H-SiC 功率MOSFET失效机理研究

Failure mechanism of double-trench (DT) 4H-SiC power MOSFET under unclamped inductive switch test

物理学报. 2022, 71(13): 137302 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220095

石墨烯过渡层对金属/SiC接触肖特基势垒调控的第一性原理研究

First principle study on modulating of Schottky barrier at metal/4H-SiC interface by graphene intercalation

物理学报. 2022, 71(5): 058102 https://doi.org/10.7498/aps.71.20211796

高温对MOSFET ESD防护器件维持特性的影响

Effect of high-temperature on holding characteristics in MOSFET ESD protecting device

物理学报. 2022, 71(12): 128501 https://doi.org/10.7498/aps.71.20220172