

金刚石高压场效应管单粒子效应研究

付 裕¹, 张振东^{2,3*}, 钱 鹏¹, 王若琛¹, 任泽阳¹, 苏 凯¹, 池雅庆^{2,3}, 张进成¹, 郝 跃¹

(1. 西安电子科技大学集成电路学部宽禁带半导体器件与集成技术国家重点实验室, 陕西西安 710071;

2. 国防科技大学计算机学院, 湖南长沙 410073; 3. 国防科技大学先进微处理器芯片与系统重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 金刚石凭借其超宽禁带、超高热导率、高击穿场强以及优异的载流子输运和抗辐照潜力等特性, 在抗辐照高压功率器件领域具有重要应用前景, 尤其适用于空间电源系统、深空探测平台和高能粒子辐射环境下的功率调控单元。然而, 针对决定器件在轨可靠性的关键失效模式——单粒子效应, 目前国际上尚缺乏关于金刚石场效应管的实验报道, 相关失效机制、耐受阈值及瞬态响应特性仍有待系统阐明。本文制备了p沟道氢终端金刚石高压金属-氧化物-半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET), 通过金属化后退火工艺优化了器件的界面质量与电学性能, 器件关态击穿电压达-980 V, 且漏电水平优于国外同类器件, 表明所制备器件具备开展高压偏置辐照验证的基础条件。在此基础上, 分别利用Ta离子(LET值为77.6 MeV·cm²/mg)和Kr离子(LET值为37.9 MeV·cm²/mg)开展了重离子单粒子辐照实验, 首次从实验上揭示了金刚石FET的单粒子烧毁与单粒子瞬态特性。实验结果表明, 器件在200 V工作偏置下, 对两种LET值的重离子均未发生单粒子烧毁, 抗烧毁LET阈值高于77.6 MeV·cm²/mg, 初步验证了金刚石FET在高LET重离子辐照环境下的抗单粒子烧毁潜力; 在Ta离子辐照下仅捕获到1次幅值约40 V的瞬态脉冲, 在Kr离子辐照下未出现可分辨的瞬态事件, 展现出对单粒子效应的强耐受性。本工作为金刚石抗辐照功率器件设计及其空间辐射效应研究提供了关键实验依据, 并为后续开展更高偏置、更高LET条件下的器件可靠性评估奠定了基础。

关键词: 金刚石; 场效应管; 高压功率器件; 抗辐照特性; 单粒子烧毁; 单粒子瞬态

基金项目: 国家自然科学基金(No.62421005, No.62404172); 国防科技大学自主创新科学基金(No.24-ZZCX-ZXGC-10)

中图分类号: TP211+5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)06-2649-08

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20260597

Single-Event Effects in High-Voltage Diamond Field-Effect Transistors

FU Yu¹, ZHANG Zhendong^{2,3*}, QIAN Peng¹, WANG Ruochen¹, REN Zeyang¹,

SU Kai¹, CHI Yaqing^{2,3}, ZHANG Jincheng¹, HAO Yue¹

(1. State Key Laboratory of Wide-Bandgap Semiconductor Devices and Integrated Technology, Faculty of Integrated Circuit, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China; 2. School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

3. National Key Laboratory of Advanced Microprocessor Chips and Systems, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Owing to its exceptional properties such as an ultrawide bandgap, ultrahigh thermal conductivity, high breakdown field, as well as excellent carrier transport and radiation resistance potential, diamond holds significant promise for radiation-hardened high-voltage power devices, and is particularly suitable for power regulation units in space power systems, deep space exploration platforms and high-energy particle radiation environments. However, with respect to single-event effects, which represent a critical failure mode governing the on-orbit reliability of devices, experimental reports on diamond field-effect transistors (FETs) remain absent in the international literature, and the relevant failure mechanisms, tolerance thresholds and transient response characteristics still need to be systematically clarified. In this work, p-channel hydrogen-terminated diamond high-voltage metal-oxide-semiconductor FETs (MOSFETs) are fabricated, and a post-metallization annealing process is employed to improve the interface quality and electrical performance. The devices achieve an off-state breakdown voltage of -980 V with a leakage level superior to that of comparable devices reported abroad, indicating that the fabricated devices have the basic conditions for carrying out high-voltage bias irradiation verification. Based on this foundation, heavy-ion single-event irradiation experiments using Ta ions (LET = 77.6 MeV·cm²/mg) and Kr ions (LET = 37.9 MeV·cm²/mg) are carried out, revealing for the first time the single-event burnout and single-event transient characteristics of diamond FETs experimentally. The experimental results demonstrate that under a bias of 200 V, no single-event

burnout occurred for either ion species, and the burnout threshold exceeds $77.6 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, preliminarily verifying the single-event burnout resistance potential of diamond FETs in high-LET heavy-ion irradiation environments. Only one transient pulse with an amplitude of approximately 40 V is captured during Ta-ion irradiation, whereas no discernible transient events were observed under Kr-ion irradiation, indicating a strong tolerance to single-event effects. This work provides a key experimental basis for the design of radiation-hardened diamond power devices and the investigation of their space radiation effects, and lays a foundation for subsequent reliability evaluation of devices under higher bias and higher LET conditions.

Keywords: diamond; field effect transistor; high-voltage power device; radiation resistance characteristics; single-event burnout; single-event transient

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62421005, No.62404172); National University of Defense Technology Independent Innovation Science Foundation (No.24-ZZCX-ZXGC-10)

0 引言

随着我国载人航天、深空探测、卫星星座等一系列重大宇航工程不断推进,作为航天器“心脏”的抗辐照电子器件受到前所未有的关注。在电推进、激光通信、太空算力等新型航天技术的发展应用过程中,高压大功率器件是重要的技术支撑之一,以满足宇航电子设备高性能、轻型化和小型化的迫切发展需求^[1]。目前,卫星电源系统一般采用 100 V 母线,功率容量极限约 20 kW,主要采用绝缘衬底硅(Silicon-On-Insulator, SOI)等硅基功率器件。新一代卫星平台功率容量将扩展到 100 kW 以上,350 V 以上母线高压电源系统有望成为主流技术。然而,硅材料的禁带宽度较小、热导率较低,限制了现有主流硅基器件在更高电压、更强辐射条件等极端工况下的应用潜力。相比之下,金刚石具有超宽禁带、超高热导率、高载流子迁移率和抗强辐射等优异特性,使得金刚石高压功率器件有望弥补传统硅基器件在抗单粒子效应等方面能力的不足,成为当前的研究热点^[2-7]。

对于金刚石半导体而言,掺杂杂质的电离能普遍较高,导致其在室温下难以有效激活,严重制约了传统体掺杂器件的发展^[8-9]。为此,利用氢等离子体处理在金刚石表面形成氢终端,进而诱导产生二维空穴气(Two-Dimensional Hole Gas, 2DHG)并构建表面沟道场效应晶体管,已成为当前实现金刚石功率电子器件的核心技术路径^[10-11]。历经三十余年的发展,氢终端金刚石高压场效应晶体管取得了重要进展,多项研究报道了击穿电压达千伏级的器件。日本早稻田大学采用厚度为 200 nm 的原子层沉积氧化铝(Al_2O_3)作为钝化介质,首次报道了击穿电压接近 1 kV 的氢终端金刚石 MOSFET^[12]。随后,该团队通过部分氧终端沟道设计,将器件击穿电压提高至 2 021 V^[13]。此外,日本佐贺大学通过引入二次钝化结构,将击穿电压进一步提升至 2 608 V^[14]。此后,该团队在异质外延金刚石衬底上制备了经二氧化氮(NO_2)处理的氢

终端金刚石 MOSFET,最终实现了超过 4 kV (4 266 V) 的击穿电压,但该类器件漏电现象显著,其漏电机理尚不明确^[15-16]。近期,西安电子科技大学提出氢/硅复合终端沟道新结构,实现了增强型金刚石高压场效应管,器件击穿电压达到 1 376 V^[17]。

金刚石材料的抗辐照特性已在辐射探测器领域得到广泛验证^[18-19],相比之下,金刚石功率管的抗辐照特性报道较少。意大利罗马第二大学开展了氢终端金刚石金属-半导体场效应晶体管(Metal-Semiconductor FET, MESFET)的中子辐照实验,验证了器件在 14.8 MeV 中子辐照下(最高 10^{14} n/cm^2)性能稳定^[20]。随后,日本北海道大学报道了一款抗辐射氢终端金刚石 FET,器件在剂量为 1 MGy 的 X 射线辐照后,直流特性未出现显著退化^[21]。印度理工学院通过 TCAD 模拟分析了氢终端金刚石 MOSFET 在 X 射线辐射下的电学性能^[22]。结果表明,在 1 kGy 至 10 MGy 辐射剂量和 300~800 K 温度范围内,器件保持高开/关电流比,且当辐射剂量超过 10 kGy 时,跨导和亚阈值摆幅变化较小。针对空间应用中决定器件在轨可靠性的关键失效模式——单粒子效应,现有研究仅停留在仿真模拟阶段,主要包括对金刚石肖特基二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)及 MOSFET 进行的单粒子效应数值仿真分析。湘潭大学与西北核技术研究所合作,通过 TCAD 模拟分析单粒子特性^[23]。仿真结果表明,重离子入射导致的金刚石 SBD 内部晶格温度升高,与反向偏置电压、LET 值及离子入射深度均呈正相关。美国伦斯勒理工学院针对金刚石高压 MOSFET 的单粒子烧毁(Single Event Burnout, SEB)特性开展了 3D 电热瞬态仿真研究,分析了重离子诱导下准横向和横向金刚石 MOSFET 的 SEB 效应^[24]。结果表明,金刚石优异的热导率可抑制中间等离子体(Mesoplasma)扩散,使器件在高达 600~800 V 电压下仍能存活,SEB 鲁棒性超过实际阻断能力的一半。综上所述,目前国际上缺乏关于金刚石 FET 单粒子辐照效应的实验报道,其单粒子烧毁阈值与瞬态响应特性

仍不明确,这制约了金刚石功率器件在航空航天等极端辐照环境下的应用推广。

基于此,本文面向抗辐照高压功率器件的应用需求,制备了氢终端金刚石横向高压 MOSFET,通过金属化后退火工艺优化了器件的界面质量与电学性能。在此基础上,设计了重离子单粒子辐照试验方案,并搭建了相应的单粒子效应测试系统,随后基于空间环境地面模拟装置开展了不同 LET 值重离子的辐照试验,首次通过实验研究了金刚石 FET 的单粒子烧毁与单粒子瞬态特性,为金刚石抗辐照功率器件的设计与应用提供了关键支撑。

1 实验

1.1 器件制备与工艺优化

本研究制备的氢终端金刚石 MOSFET 器件结构和工艺流程示意图分别如图 1 和图 2 所示,衬底采用尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的 II a 型(100)晶向单晶金刚石晶片。首先,将金刚石衬底置于 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的浓 $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ 热混酸溶液中清洗 30 min,随后依次在丙酮、无水乙醇与去离子水中分别进行 15 min 超声清洗,达到去除衬底表面非金刚石相和污染物的目的。氢终端金刚石的制备采用低浓度 CH_4 参与的微波等离子体处理工艺,总气体流量保持 400 sccm,通入 CH_4/H_2 体积比为 0.5% 的反应气体,在微波功率 2 kW、衬底温度 $800\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、腔体压力 80 mbar 条件下处理 15 min。处理完成后关闭微波功率,在氢气氛围中原位冷却 15 min。器件制备工艺中,首先通过电子束蒸发设备在氢终端金刚石表面沉积 100 nm 厚的 Au 薄膜,与氢终端金刚石形成欧姆接触,再结合光刻工艺与 KI/I_2 溶液湿法腐蚀,完成源/漏电极的图形化制备。随后,通过光刻胶图形化保护器件有源区,采用电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀设备,对样品进行 45 s 氧等离子体处理(ICP 功率 100 W),将有源区外的氢终端转化为氧终端,实现器件单元间的电学隔离。隔离工艺完成后,采用原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)技术,在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 沉积温度下制备 100 nm 厚的 Al_2O_3 薄膜作为器件的栅介质与钝化层。然后,通过光刻与干法刻蚀工艺对源/漏电极上方的 Al_2O_3 薄膜进行选择性开窗,暴露源/漏金属电极。最后采用热蒸发设备沉积 100 nm 厚的 Al 薄膜,通过剥离工艺形成栅电极,同时在源/漏电极上方形成加厚 Al 电极,完成器件的整体制备。器件实物图如图 3 所示,栅源间距(L_{GS})与栅长(L_{G})均为 $4\text{ }\mu\text{m}$,栅漏间距(L_{GD})为 $30\text{ }\mu\text{m}$,栅宽 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。为进一步优化器件电学性能与界面质量,对制备完成的器件进行金属

化后退火(Post-Metallization Annealing, PMA)工艺处理。本研究采用快速退火炉,在氮气氛围、 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下对器件进行 7 min 的退火处理,以避免因后退火温度过高,导致 Al_2O_3 薄膜特性发生较大变化^[25]。最后,采用 Keysight B1500A 半导体器件参数分析仪对器件的直流电学特性进行测试表征。

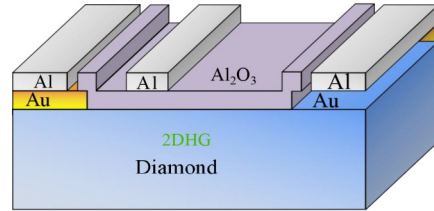


图1 氢终端金刚石高压 MOSFET 结构示意图

Figure 1 Schematic structure of high-voltage hydrogen-terminated diamond MOSFET

1.2 单粒子辐照测试

本文采用的单粒子辐照试验方案如图 4 所示,该测试系统由试验电路板、高压程控电源、示波器、控制计算机与监控计算机等部分组成,基于空间环境地面模拟装置开展重离子辐照试验。试验电路板为被测器件提供承载平台,确保加速器产生的重离子束流可准确入射至器件有源区,高压程控电源为器件提供可调节的工作偏置,示波器用于捕获单粒子瞬态过程中的电压波形,控制计算机与高压程控电源、示波器相连,可在单粒子烧毁发生时触发电源限流与断电保护,同时控制示波器完成瞬态波形的精准捕获,监控计算机安置于辐照室外的安全区域,通过网线与控制计算机远程连接,实现试验过程的全远程操控。测试环境温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,重离子束流通过扫描系统均匀地扫描至器件有源区,确保粒子通量分布均匀。

在单粒子辐照测试之前,需要先将金刚石 FET 封装在试验电路板中,图 5 给出了本文采用的试验电路板接线示意图及实物图。针对金刚石 FET 的 p 沟道和耗尽型两个特点,试验过程中被测器件的源极 S 接高压程控电源输出的高压 V_{H} ,栅极 G 通过电池串联 $1\text{ M}\Omega$ 电阻施加 $V_{\text{H}}+18\text{ V}$ 的偏置电压,确保器件在辐照过程中稳定工作于截止区,漏极 D 通过 $1\text{ M}\Omega$ 电阻接地,示波器高压探头连接至漏极 D,实时监测漏极电压变化。辐照开始前,先去掉电池并短接电池槽两端,由高压程控电源输出 100 V 电压,记录示波器指示电压 V_{ON} ,作为辐照后器件功能是否正常的参照基准。辐照过程中,高压程控电源持续提供 $V_{\text{H}}=200\text{ V}$ 的工作偏置并实时监控供电电流,示波器持续采集漏极电压信号,当未发生单粒子烧毁或单粒子瞬态时,

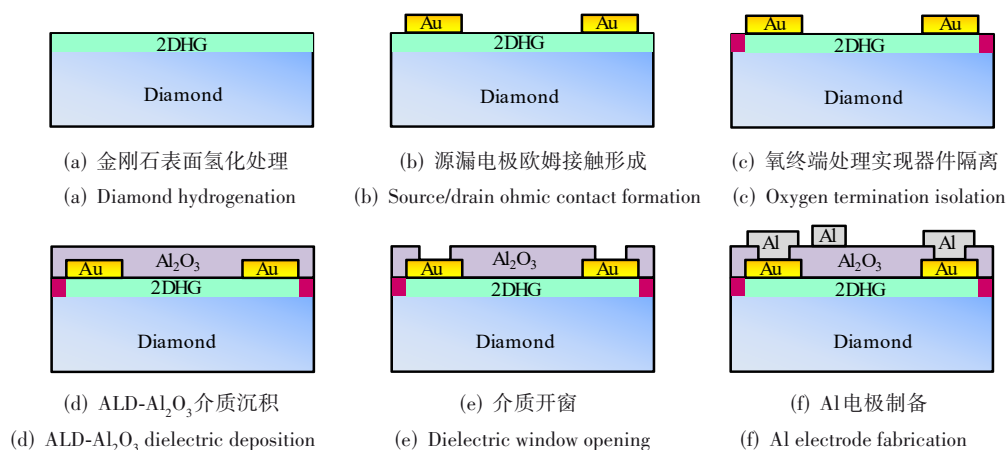


图2 金刚石高压 MOSFET 器件工艺流程图

Figure 2 Fabrication process flow of high-voltage diamond MOSFET

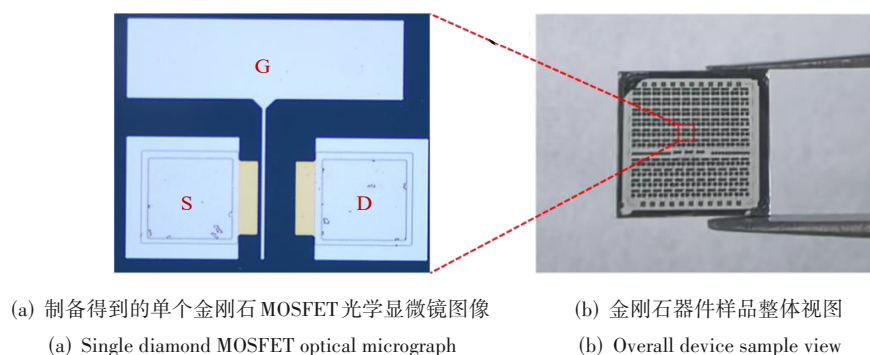


图3 制备的金刚石高压 MOSFET 器件形貌图

Figure 3 Morphology of the fabricated high-voltage diamond MOSFET devices

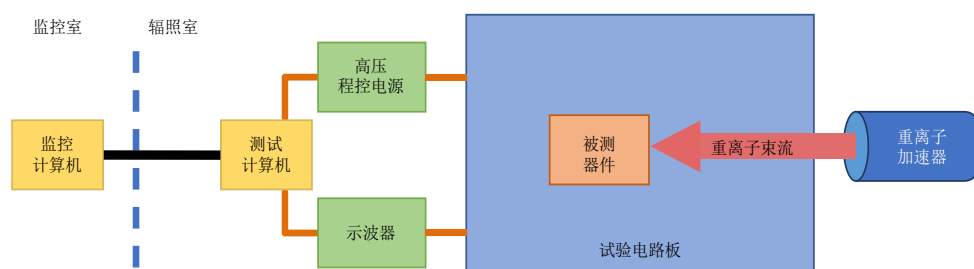


图4 单粒子效应测试系统部署示意图

Figure 4 Schematic layout of single-event effect test system

示波器指示电压接近 0 V; 当发生单粒子瞬态时, 示波器捕获并记录瞬态电压脉冲; 当发生单粒子烧毁时, 示波器捕获的电压变为恒高, 系统立即触发高压电源断电保护, 避免器件进一步损坏。辐照完成后, 再次通过 100 V 偏置下的漏极电压测试, 判断器件是否发生不可逆的功能失效。

单粒子试验的终止条件遵循以下原则: 对于单粒子烧毁试验, 当连续辐照总注量达到 1×10^7 ions/cm² 或发生 1 次单粒子烧毁事件时, 终止本次试验; 对于单

粒子瞬态试验, 当连续辐照总注量达到 1×10^7 ions/cm² 或捕获到 50 次单粒子瞬态事件时, 终止本次试验。试验分别选取 LET 值为 77.6 MeV·cm²/mg 的 Ta 离子与 37.9 MeV·cm²/mg 的 Kr 离子作为辐照源, 两轮试验均在 $V_H = 200$ V 的工作偏置下进行, Ta 离子辐照试验的平均注量率为 $1.572 \times 10^4/(s \cdot cm^2)$, Kr 离子辐照试验的平均注量率为 $1.167 \times 10^4/(s \cdot cm^2)$, 辐照过程中全程实时记录器件的电学响应与辐照事件。

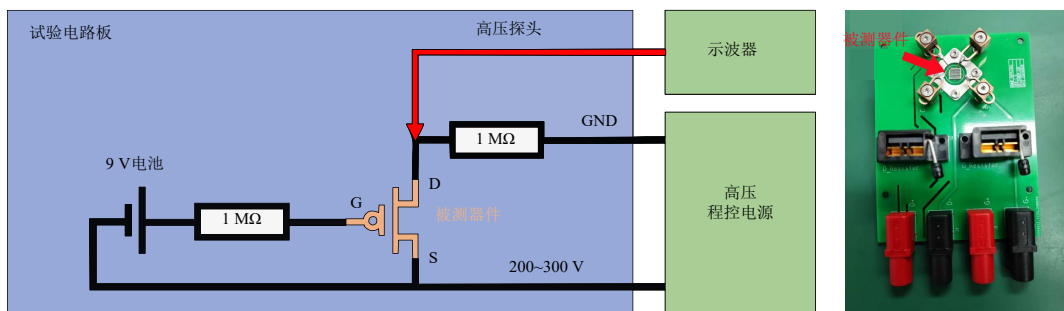


图5 试验电路板接线示意图及实物图

Figure 5 Wiring schematic and physical photograph of test circuit board

2 结果和分析

2.1 金属化后退火(PMA)工艺对器件电学性能的影响

对于器件的直流特性,金属化后退火前后的器件输出特性对比结果如图6所示,其中蓝色曲线为退火前的测试结果,红色曲线为退火后的测试结果。在 $V_{GS} = -20\text{ V}$ 、 $V_{DS} = -200\text{ V}$ 的偏置条件下,器件的饱和漏电流密度由退火前的 -46 mA/mm 提升至退火后的 -86 mA/mm ,电流输出能力得到大幅提升。此外,可以看到退火前器件的输出特性曲线在 $V_{DS} = 0 \sim -20\text{ V}$ 区间内出现了轻微的非线性特性,即 I_D 没有与 V_D 保持线性增长关系,反映出退火前源/漏欧姆接触性能不佳;而经退火处理后,电流随电压的变化更接近理想线性关系,表明器件欧姆接触特性得到明显改善。这一变化可归因于:本研究进行源漏Au/Al电极金属热蒸发时衬底温度为室温,制备得到的金属内部可能存在较多缺陷与残余应力;260℃的退火过程为原子扩散提供了能量,促进了薄膜内缺陷的修复与应力释放,优化了金属薄膜质量并提升了导电能力。进一步地,对退火前后器件样品上的传输线结构进行测试表征,欧姆接触电阻(R_c)由退火前的 $8.19\ \Omega \cdot \text{mm}$ 降至退火后的 $4.9\ \Omega \cdot \text{mm}$,与上述器件输出特性的分析结果相吻合。传输线结构测试结果还表明,退火前 Al_2O_3 /氢终端金刚石结构的方块电阻为 $17\text{ k}\Omega/\text{sq}$,退火后升至 $35\text{ k}\Omega/\text{sq}$ 。对于高温ALD- Al_2O_3 钝化的氢终端金刚石,以往研究认为是 Al_2O_3 介质中的负固定电荷极化感应得到了2DHG沟道,并且这种沟道的电导特性在介质沉积后退火(Post-Deposition Annealing, PDA)之后会出现降低^[26]。

对器件而言,介质中的负固定电荷不仅会增加电荷散射概率降低沟道迁移率,还会降低阈值电压稳定性。图7展示了退火前后器件在正反扫描模式下的转移特性测试结果,其中 $V_{DS} = -5\text{ V}$ 。结果显示,退火后器件转移特性回滞窗口显著减小,这主要归因于退

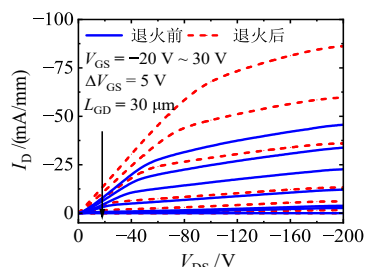


图6 金属化后退火前、后器件输出特性曲线

Figure 6 Output characteristic curves of devices before and after post-metallization annealing

火工艺减少了界面处的固定电荷和界面陷阱数量,削弱了栅压正反扫过程中的电荷俘获/释放效应。因此,转移特性的正反扫回滞窗口大幅收窄,阈值电压漂移基本消除,对应退火后的图7(b)中0 V附近正反扫曲线基本重合,器件阈值电压约为2 V。在高压阻断特性方面,退火后的器件在 $V_{GS} = 30\text{ V}$ 的关断偏置下,实现了击穿电压 -980 V ,如图8所示。可以看到,击穿前关态漏电流始终维持在 $10^{-7} \sim 10^{-4}\text{ mA/mm}$ 的较低水平,优于国外同类器件水平($\sim 1\text{ mA/mm}$)^[16]。因此,本文采用的PMA工艺潜在地提升了器件的工作稳定性,器件优异的高压阻断能力为后续的单粒子辐照特性测试提供了更好的支撑。

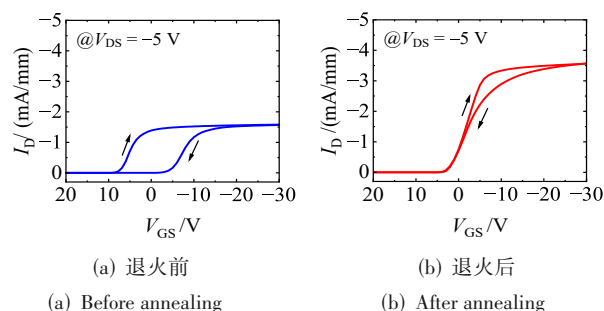


图7 退火前后器件在正反扫描模式下的转移特性测试结果

Figure 7 Measured transfer characteristics of the device under forward and reverse sweep before and after annealing

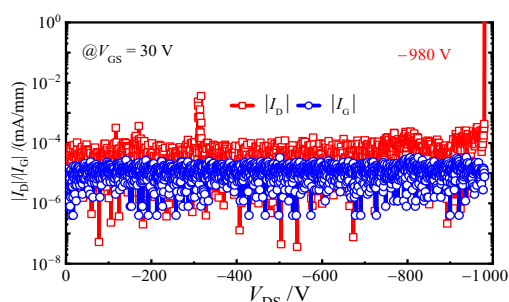


图8 器件在 $V_{GS} = 30$ V 关断偏置下的击穿特性曲线

Figure 8 Breakdown characteristic curve of the device under off-state bias of $V_{GS} = 30$ V

2.2 单粒子烧毁特性

单粒子烧毁特性方面,在LET值为 $77.6 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的 Ta 离子辐照试验中,当累计辐照总注量达到 $1 \times 10^7 \text{ ions/cm}^2$ 时,器件未发生任何单粒子烧毁事件,辐照完成后的器件功能测试显示,其电学特性与辐照前相比未出现不可逆退化;在LET值为 $37.9 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的 Kr 离子辐照试验中,累计辐照总注量同样达到 $1 \times 10^7 \text{ ions/cm}^2$ 时,器件仍未出现单粒子烧毁现象,辐照后器件的关断与导通特性均保持稳定。上述实验结果直接证实,本文制备的氢终端金刚石FET抗单粒子烧毁的LET阈值高于 $77.6 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,在200 V工作偏置下对高能重离子辐照具备较强的抗烧毁能力。该优异特性主要源于金刚石材料本征的材料优势,一方面,金刚石的超宽禁带与强共价键结构,使得高能重离子入射后传递给晶格的能量难以产生大量不可逆的缺陷,同时金刚石超高的热导率可快速耗散单粒子入射产生的局部热量,避免热失控引发的器件烧毁;另一方面,氢终端金刚石器件优化后的低漏电特性,抑制了单粒子入射产生的非平衡载流子引发的雪崩倍增效应,避免了漏电流正反馈导致的二次击穿,大幅提升了器件的抗单粒子烧毁阈值。

2.3 单粒子瞬态特性

在单粒子瞬态特性方面,Kr离子辐照的全过程中,示波器未捕获到任何可分辨的单粒子瞬态脉冲波形,表明器件在LET值 $37.9 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的重离子辐照下,对单粒子瞬态效应几乎不敏感;在Ta离子辐照过程中,仅在辐照时间为379 s、累计注量达到 $5.96 \times 10^6 \text{ ions/cm}^2$ 时,观测到1次单粒子瞬态脉冲事件(见图9),该瞬态脉冲幅值约40 V,对应峰值电流约40 μA ,事件发生后器件的电学特性未出现任何不可逆变化,也未引发后续的单粒子烧毁,属于非致命性的瞬态响应。分析认为,氢终端金刚石的表面电导及衬底的体电导都具备较高的载流子迁移率,高能重离子入射器件灵敏区后电离产生的非平衡载流子,可通过快速的输运与复合过程被快速耗散,难以在漏极形成持续、可观测的

瞬态电流脉冲;同时,低LET值的Kr离子在器件中电离产生的电子-空穴对数量有限,不足以触发可分辨的单粒子瞬态响应,而高LET值的Ta离子虽能产生少量瞬态事件,但无法引发器件的雪崩击穿与不可逆烧毁,进一步证实了氢终端金刚石FET对单粒子瞬态效应的强耐受性。

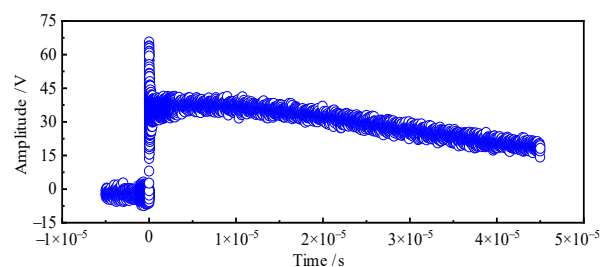


图9 Ta离子辐照第379 s时的单粒子瞬态电压波形图

Figure 9 Single-event transient voltage waveform captured at 379 s during Ta-ion irradiation

3 结束语

本文针对航天器高压功率器件抗辐照能力的迫切需求,首次开展了金刚石高压FET的重离子单粒子效应实验研究。研究首先通过金属化后退火工艺优化了器件的欧姆接触与界面特性,击穿电压达到-980 V。在此基础上,开展了Ta离子和Kr离子的重离子单粒子辐照实验,首次从实验上获得了金刚石FET的单粒子烧毁与瞬态响应数据。实验结果表明,在200 V偏置和所测试的LET值(最高 $77.6 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$) 范围内,器件未发生单粒子烧毁,且仅在Ta离子辐照下出现1次幅值约40 V的瞬态脉冲,初步展现了金刚石FET对单粒子效应的低敏感性。该结果可归因于金刚石超宽禁带与超高热导率对雪崩倍增效应和局部热失控的有效抑制。本文工作为金刚石功率器件在空间辐照环境下的应用积累了初步的实验数据,其更广泛的可靠性和失效机制有待进一步研究。

参考文献

- [1] 赵元富,王亮,岳素格,等. 宇航抗辐射加固集成电路技术发展与思考[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(4): 12-18.
Zhao Yuanfu, Wang Liang, Yue Suge, et al. Development and considerations for aerospace radiation-hardened integrated circuit[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(4): 12-18. (in Chinese)
- [2] 郝跃. 宽禁带与超宽禁带半导体器件新进展[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 58-61.
Hao Yue. New progress in wide and ultra-wide bandgap semiconductor devices[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(3): 58-61. (in Chinese)

- [3] 张金凤, 张进成, 任泽阳, 等. 金刚石二维电导和场效应管研究新进展[J]. 电子学报, 2024, 52(6): 2151-2160.
Zhang Jinfeng, Zhang Jincheng, Ren Zeyang, et al. Research progress of two-dimensional electrical conductivity and field effect transistors of diamond[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(6): 2151-2160. (in Chinese)
- [4] 马孟宇, 蔚翠, 何泽召, 等. 氢终端金刚石薄膜生长及其表面结构[J]. 物理学报, 2024, 73(8): 323-328.
Ma Mengyu, Yu Cui, He Zezhao, et al. Growth and surface structure of hydrogen terminal diamond thin films[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(8): 323-328. (in Chinese)
- [5] Yu Xinxin, Qiao Bin, Sun Yan, et al. High- k /diamond RF MOSFETs with record high $f_T/f_{\max}$ of 90/164 GHz and first demonstration of a diamond MMIC[C]//Proceedings of 2024 IEEE International Electron Devices Meeting. Piscataway: IEEE, 2024: 1-4.
- [6] Zhang Wenchao, Liu Benjian, Chen Ziyi, et al. Ultralow-consumption ferroelectric-like diamond transistors for advancing logic circuits[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(34): e23162.
- [7] Li Chuanlong, Liu Benjian, Liang Bo, et al. High-open-circuit voltage diamond alpha-voltaic battery with interface reconstructed by amorphous gallium oxide[J]. Carbon, 2026, 250: 121251.
- [8] Liu Jiangwei, Teraji T, Da Bo, et al. High output current boron-doped diamond metal-semiconductor field-effect transistors[J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(11): 1748-1751.
- [9] Shimaoka T, Liao Meiyong, Koizumi S. N-type diamond metal-semiconductor field-effect transistor with high operation temperature of 300 °C[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43(4): 588-591.
- [10] Kwarada H, Aoki M, Ito M. Enhancement mode metal-semiconductor field effect transistors using homoepitaxial diamonds[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(12): 1563-1565.
- [11] 付裕. 氢终端和硅终端金刚石 MOSFET 研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Fu Yu. Research on hydrogen- and silicon-terminated diamond MOSFETs[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022. (in Chinese)
- [12] Kwarada H, Yamada T, Xu D, et al. Wide temperature (10 K-700 K) and high voltage (~1 000 V) operation of C-H diamond MOSFETs for power electronics application[C]//Proceedings of 2014 IEEE International Electron Devices Meeting. Piscataway: IEEE, 2014: 11.2.1-11.2.4.
- [13] Kitabayashi Y, Kudo T, Tsuboi H, et al. Normally-off C-H diamond MOSFETs with partial C-O channel achieving 2-kV breakdown voltage[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(3): 363-366.
- [14] Saha N C, Kim S W, Oishi T, et al. 345-MW/cm² 2608-V NO₂ p-type doped diamond MOSFETs with an Al₂O₃ passivation overlayer on heteroepitaxial diamond[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(6): 903-906.
- [15] Saha N C, Kim S W, Koyama K, et al. 3659-V NO₂ p-type doped diamond MOSFETs on misoriented heteroepitaxial diamond substrates[J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(1): 112-115.
- [16] Saha N C, Eguchi M, Oishi T, et al. High off-state voltage (4 266 V) diamond metal oxide semiconductor field effect transistors[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2025, 43(4): 042201.
- [17] Fu Yu, Ren Zeyang, Su Kai, et al. Integration of oxidized silicon- and hydrogen-terminated diamond p-channels for normally-off high-voltage diamond power devices[J]. IEEE Electron Device Letters, 2025, 46(3): 330-333.
- [18] 苏凯. 高性能CVD金刚石核探测器及相关电子器件研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
Su Kai. Investigation of high performance CVD diamond radiation detectors and related electronic devices[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [19] Ding Senchuan, Zhang Jinfeng, Su Kai, et al. Single-crystal diamond grown through high-power-density epitaxy used for a high-performance radiation detector[J]. Science China Materials, 2024, 67(7): 2329-2334.
- [20] Verona C, Ciccognani W, Colangeli S, et al. 14.8-MeV neutron irradiation on H-terminated diamond-based MESFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 2016, 37(12): 1597-1600.
- [21] Yamaguchi T, Umezawa H, Ohmagari S, et al. Radiation hardened H-diamond MOSFET (RADDFET) operating after 1 MGy irradiation[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(16): 162105.
- [22] Pullaiah Y, Bajaj M, Nayak K. Investigation of X-ray irradiance hardness and high temperature operation of H-terminated diamond MOSFET[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2025, 72(2): 557-563.
- [23] Cao Yanhui, Guo Hongxia, Ma Wuying, et al. Study on single event effects of diamond Schottky diodes based on TCAD simulation[J]. APL Electronic Devices, 2025, 1(2): 026103.
- [24] He Z, Ponomarev I, Chow T P. Single-event burnout evaluation in high voltage lateral and quasi-lateral diamond

MOSFETs[J]. Diamond and Related Materials, 2025, 155: 112347.

- [25] Hiraiwa A, Matsumura D, Okubo S, et al. Post-deposition-annealing effect on current conduction in Al_2O_3 films formed by atomic layer deposition with H_2O oxidant[J].

Journal of Applied Physics, 2017, 121(7): 074502.

- [26] Daicho A, Saito T, Kurihara S, et al. High-reliability passivation of hydrogen-terminated diamond surface by atomic layer deposition of Al_2O_3 [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(22): 223711.

作者简介



付 裕 男, 1993年3月生, 重庆人。西安电子科技大学集成电路学部副教授、硕士生导师。主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料和器件。中国电子学会会员编号:E190157301M。
E-mail: fuyu@xidian.edu.cn



苏 凯 男, 1988年10月生, 陕西铜川人。西安电子科技大学集成电路学部副教授、硕士生导师。主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料及器件。
E-mail: ksu@xidian.edu.cn



张振东 男, 1994年6月生, 湖南邵东人。国防科技大学计算机学院博士后。主要研究方向为碳基材料及器件可靠性技术。
E-mail: zhangzhendong1994@nudt.edu.cn



池雅庆 男, 1982年2月生, 重庆人。国防科技大学计算机学院研究员, 湖南省宇航学会理事, 教育部“高性能微处理器技术”创新团队骨干。主要研究方向为先进集成电路辐射效应与高性能抗辐射微处理器设计。
E-mail: yqchi@nudt.edu.cn



钱 鹏 男, 2002年3月生, 黑龙江哈尔滨人。西安电子科技大学集成电路学部硕士研究生。主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石器件。
E-mail: 23111213513 @stu.xidian.edu.cn



张进成 男, 1976年7月生, 陕西富平人。西安电子科技大学二级教授、博士生导师, 西安电子科技大学党委常委、副校长, 国家级人才。主要研究方向为宽禁带与超宽禁带半导体器件与集成电路。中国电子学会会员编号:E190008613M。
E-mail: jchzhang@xidian.edu.cn



王若琛 男, 2002年9月生, 山东烟台人。西安电子科技大学集成电路学部硕士研究生。主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石器件。
E-mail: 1209275577@qq.com



郝 跃 男, 1958年3月生, 安徽阜阳人。中国科学院院士, 西安电子科技大学集成电路学部教授、博士生导师。主要研究方向为宽禁带和超宽禁带半导体材料与器件、微纳半导体新器件及可靠性、SoC设计与设计方法学。中国电子学会会员编号:E190008304F。
E-mail: yhao@xidian.edu.cn



任泽阳 男, 1991年8月生, 山东枣庄人。西安电子科技大学集成电路学部教授、硕士生导师。主要研究方向为超宽禁带半导体金刚石材料和器件。
E-mail: zeyangren@xidian.edu.cn