



氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究

陈睿 梁亚楠 韩建伟 王璇 杨涵 陈钱 袁润杰 马英起 上官士鹏

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays

Chen Rui Liang Ya-Nan Han Jian-Wei Wang Xuan Yang Han Chen Qian Yuan Run-Jie Ma Ying-Qi Shangguan Shi-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 116102 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20202028

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>

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

氮化镓基感光栅极高电子迁移率晶体管器件设计与制备

Design and fabrication of high electron mobility transistor devices with gallium nitride-based

物理学报. 2017, 66(24): 247203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.247203>

铁电存储器60Co γ 射线及电子总剂量效应研究

Total ionizing dose effect of ferroelectric random access memory under Co-60 gamma rays and electrons

物理学报. 2018, 67(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180829>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管器件中子位移损伤效应及机理

Neutron-induced displacement damage effect and mechanism of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200714>

基于凹槽结构抑制AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管电流崩塌效应

Current collapse suppression in AlGaIn/GaN high electron mobility transistor with groove structure

物理学报. 2019, 68(24): 248501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191311>

结构参数对N极性面GaN/InAlN高电子迁移率晶体管性能的影响

Effect of structure parameters on performance of N-polar GaN/InAlN high electron mobility transistor

物理学报. 2019, 68(24): 247203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191153>

基于脉冲方法的超短栅长GaN基高电子迁移率晶体管陷阱效应机理

Mechanisms of trapping effects in short-gate GaN-based high electron mobility transistors with pulsed I-V measurement

物理学报. 2018, 67(17): 178501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180474>

氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究^{*}

陈睿^{1)2)†} 梁亚楠¹⁾ 韩建伟¹⁾²⁾ 王璇¹⁾²⁾ 杨涵¹⁾²⁾
陈钱¹⁾²⁾ 袁润杰¹⁾²⁾ 马英起¹⁾²⁾ 上官士鹏¹⁾

1) (中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2020 年 12 月 1 日收到; 2020 年 12 月 31 日收到修改稿)

利用重离子加速器和⁶⁰Co γ 射线实验装置, 开展了 p 型栅和共栅共源级联结构增强型氮化镓基高电子迁移率晶体管的单粒子效应和总剂量效应实验研究, 给出了氮化镓器件单粒子效应安全工作区域、总剂量效应敏感参数以及辐射响应规律. 实验发现, p 型栅结构氮化镓器件具有较好的抗单粒子和总剂量辐射能力, 其单粒子烧毁阈值大于 37 MeV·cm²/mg, 抗总剂量效应水平高于 1 Mrad (Si), 而共栅共源级联结构氮化镓器件则对单粒子和总剂量辐照均很敏感, 在线性能量传输值为 22 MeV·cm²/mg 的重离子和累积总剂量为 200 krad (Si) 辐照时, 器件的性能和功能出现异常. 利用金相显微镜成像技术和聚焦离子束扫描技术分析氮化镓器件内部电路结构, 揭示了共栅共源级联结构氮化镓器件发生单粒子烧毁现象和对总剂量效应敏感的原因. 结果表明, 单粒子效应诱发内部耗尽型氮化镓器件的栅肖特基势垒发生电子隧穿可能是共栅共源级联结构氮化镓器件发生源漏大电流的内在机制. 同时发现, 金属氧化物半导体场效应晶体管是导致共栅共源级联结构氮化镓器件对总剂量效应敏感的可能原因.

关键词: 单粒子烧毁效应, 总剂量效应, 重离子, 氮化镓高电子迁移率晶体管

PACS: 61.80.Jh, 85.30.De, 73.40.Qv

DOI: 10.7498/aps.70.20202028

1 引言

随着空间卫星、深空探测等航天技术的不断发展, 对于耐高温、大功率、小型化、适应极端辐射环境的电源系统需求日益明显^[1-4]. 氮化镓 (GaN) 基功率器件作为宽禁带半导体技术的核心代表之一, 相较于传统的硅器件具有击穿电压高、导通电阻小以及耐高温等优点, 可满足新一代航天器电源系统的应用需求. 由于采用异质结层替代栅氧层工艺, GaN 等宽禁带器件天然具有较好的抗总剂量效应 (total ionizing dose effect, TID) 能力, 但其对

空间高能粒子导致的单粒子效应 (single event effect, SEE) 较为敏感^[5-7]. 目前国内外针对 GaN 器件的总剂量效应研究相对较多, 主要涉及抗辐射 GaN 材料和工艺加固设计、p 型栅结构增强型 GaN 器件的实验评估和影响因素研究. 相关实验研究发现, 增强型 GaN 器件的抗总剂量水平可达到 1 Mrad(Si), 并初步揭示了其总剂量辐射损伤机理^[7-13]. 但目前有关共栅共源级联结构 (Cascode) GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 器件的总剂量效应研究报道较少, 尤其是对比研究不同电路结构 GaN HEMT 器件的总剂量效应的特征与规律尚存在明显不足. 相

^{*} 北京市科委项目 (批准号: E039360101) 和中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)(批准号: XDA17010301) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ch.ri.520@163.com

对于总剂量效应, GaN 器件单粒子效应研究相对薄弱, 主要集中在 GaN 器件单粒子失效模式和表现特征的实验研究, 以及相关辐射损伤机理研究存在不足, 严重制约了 GaN 器件在航天器电源系统的广泛应用.

本文针对 GaN Systems 公司 p 型栅结构和 Transphorm 公司共源共栅级联结构的增强型 GaN HEMT 器件, 利用重离子加速器和 ^{60}Co γ 射线分别进行了单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 效应和总剂量效应实验研究, 获得了 GaN HEMT 的辐射响应特征、敏感参数和区域, 并揭示了 Cascode 型 GaN HEMT 对 SEB 和总剂量辐射敏感的物理机理.

2 实验条件和样品

利用中国原子能科学院 H-13 串列加速器, 开展了 GaN HEMT 的 SEB 效应研究. 辐照离子分别为能量 169 MeV 的 ^{48}Ti 离子和 210 MeV 的 ^{74}Ge 离子, 线性能量传输值 (linear energy transfer, LET) 分别为 21.8 和 37 MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 束流强度和注量分别为 $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}/\text{s}$ 和 $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$. 利用北京大学 ^{60}Co γ 射线总剂量实验模拟源, 开展了 GaN HEMT 的总剂量效应研究, 辐照剂量率为 100 rad(Si)/s, 累积辐照总剂量分别为 200 krad(Si), 500 krad(Si) 和 1 Mrad(Si), 辐照实验参数采用在线测试. 总剂量辐照后采用室温 168 h 退火测试, 单粒子和总剂量实验现场图如图 1 所示.

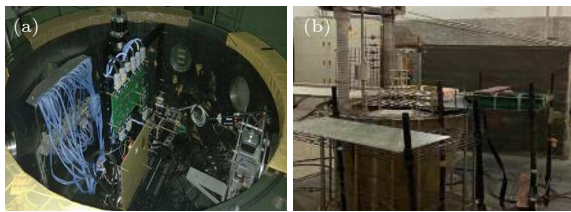


图 1 实验现场 (a) 单粒子效应实验现场; (b) 总剂量效应实验现场

Fig. 1. Experiment setup: (a) SEE experiment; (b) TID experiment.

单粒子效应和总剂量效应实验样品分别选用同一批次 GaN Systems 公司 650 V GS0650111L 型和 Transphorm 公司 900 V TP90H180PS 型的 GaN HEMT 各 5 片, 正面开封图如图 2 所示, 实验样品信息如表 1 所列. 单粒子效应实验器件均经过正面开盖处理且功能测试正常. GaN HEMT 单

粒子效应和总剂量效应的辐照实验电路参照 MIL-STD-750D 标准, 如图 3 所示, 在器件漏源端和栅源端分别通过串联电阻和并联电容接入 Keithley2470 和 2450 型圆表, 用来提供器件的偏置电压和监测器件漏源端电流、阈值电压等电学参数变化. GaN HEMT 单粒子效应实验偏置条件采用关态偏置: 漏源电压 V_{ds} 为 0—650 V(900 V), 栅源电压 V_{gs} 为 -5, -3, -1 和 0 V. 总剂量效应实验偏置条件采用关态和开态两种偏置, 其中关态偏置: V_{ds} 与 V_{gs} 均为 0 V, 开态偏置: V_{gs} 为 2.6 V, V_{ds} 为 1 V.

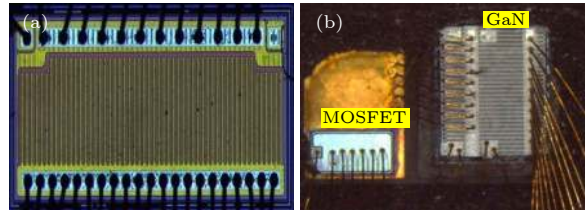


图 2 GaN 器件开封装图 (a) GS0650111L; (b) TP90H180PS

Fig. 2. The decapping photograph of GaN device: (a) GS0650111L; (b) TP90H180PS.

表 1 实验样品的参数
Table 1. Parameters of the tested sample.

型号	类型	结构	额定电压/V	导通电阻/ $\text{m}\Omega$	生产厂商
GS0650111L	增强型	p型栅	650	150	GaN Systems
TP90H180PS	增强型	Cascode	900	205	Transphorm

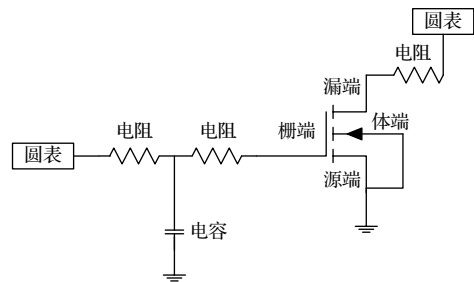


图 3 单粒子和总剂量效应实验电路原理图
Fig. 3. Schematic diagram of SEE and TID test circuit.

3 实验结果

3.1 单粒子效应实验结果

图 4(a) 给出了 GS0650111L 和 TP90H180PS 器件分别在能量为 210 MeV 的 Ge (LET 值为 37 MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$) 和能量为 169 MeV 的 Ti (LET 值为 22 MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$) 离子辐照下, 器件漏源电

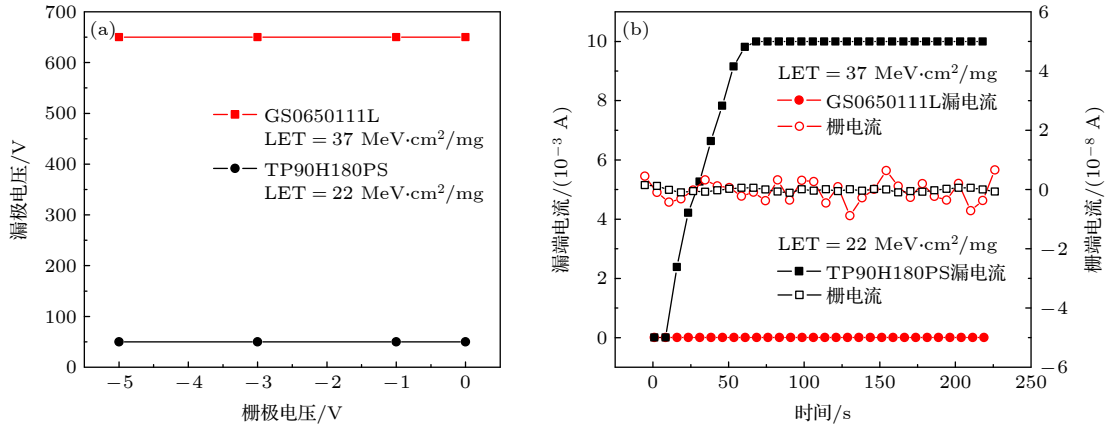


图 4 (a) GS0650111L 和 TP90H180PS 器件安全工作区域; (b) 漏、栅端电流随时间的变化

Fig. 4. (a) Safe operating area of GS0650111L and TP90H180PS; (b) the variations of drain current and gate current with time.

压 V_{ds} 随栅源电压 V_{gs} 的变化关系, 即器件 SEB 效应的安全工作区域. 当入射粒子 LET 值分别为 37 和 $22 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 随着器件的栅极电压 V_{gs} 从 -5 V 增加到 0 V, GS0650111L 和 TP90H180PS 器件的漏极电压 V_{ds} 分别保持 650 和 50 V 不变. GS0650111L 和 TP90H180PS 器件漏端电流 I_d 和栅端电流 I_g 随辐照时间的变化如图 4(b) 所示, 在粒子 LET 值为 $37 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 辐照下, GS0650111L 器件漏极电压为 650 V 时, 器件漏端电流 I_d 和栅端电流 I_g 未出现明显变化, 而当粒子 LET 值降为 $22 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 器件漏极电压为 100 V 时, TP90H180PS 器件漏端电流 I_d 随时间不断增大, 直到限流值 10 mA, 栅端电流基本保持不变, 表现出明显的漏端大电流现象.

图 5 为 TP90H180PS 器件发生 SEB 效应的实物图, 从图 5(a) 可以发现 Cascode 结构中的耗尽型 GaN HEMT 出现了 SEB 现象, 且主要发生在插指结构的金属布线层上, 而硅 (Si) 金属氧化物场效应晶体管 (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET) 未出现 SEB 现象.

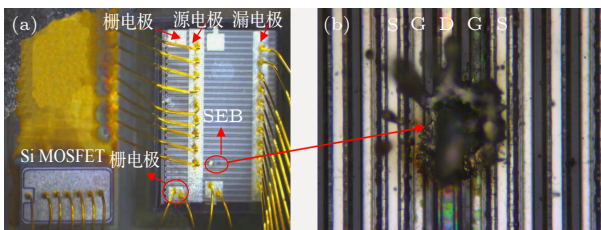


图 5 TP90H180PS 器件发生 SEB 的实物图 (a) SEB 敏感区域; (b) SEB 区域局部示意图

Fig. 5. The SEB photograph of TP90H180PS: (a) SEB sensitive areas; (b) partial enlargement of SEB sensitive areas.

图 5(b) 所示为利用金相显微镜拍照分析提取的器件 SEB 区域细节, 可以看到器件金属布线层中的栅区域和漏区域之间出了明显的烧毁现象.

3.2 总剂量效应实验结果

图 6 所示为 TP90H180PS 和 GS0650111L 器件工作在开态和关态偏置时, 器件漏电流随辐照累积剂量的变化. 当器件工作在开态偏置条件时, 从图 6(a) 可以看到, 随着辐照累积剂量增大到 200 krad(Si) 时, GS0650111L 器件的漏电流从正常工作电流约 2.1 nA 增大到约 150 μA , 当辐照剂量累积到 1 Mrad(Si) 时, 器件漏电流减小约为 75 μA . 之后, 随着退火时间增加, 器件漏电流不断减小, 当经过约 50 h 的室温退火后, 器件的漏电流基本上恢复至正常工作电流值, 而 TP90H180PS 器件在辐照剂量累积到 1 Mrad(Si) 时, 器件的漏电流基本未发生变化. 当器件工作在关态偏置条件下, 漏电流约为 20 nA. 从图 6(b) 可以看到, 当辐照累积剂量增加到 1 Mrad (Si) 时, GS0650111L 器件漏电流基本保持不变, 随后经过 168 h 的退火后, 器件的漏电增大到约 15 μA , 此时器件的功能正常. TP90H180PS 器件随着辐照累积剂量增加, 漏电流在不断增加, 累积剂量为 1 Mrad (Si) 时, 漏电流增大到约 10 μA , 但经过 168 h 小时的室温退火后, 漏电流恢复至正常工作电流值附近.

在开态和关态辐照偏置时, TP90H180PS 和 GS0650111L 器件阈值电压随辐照累积剂量的变化如图 7 所示. 从图 7(a) 可以看到, 当辐照时器件工作在开态偏置条件时, 随着辐照累积剂量增大到 1 Mrad (Si) 时, TP90H180PS 器件的阈值电压负

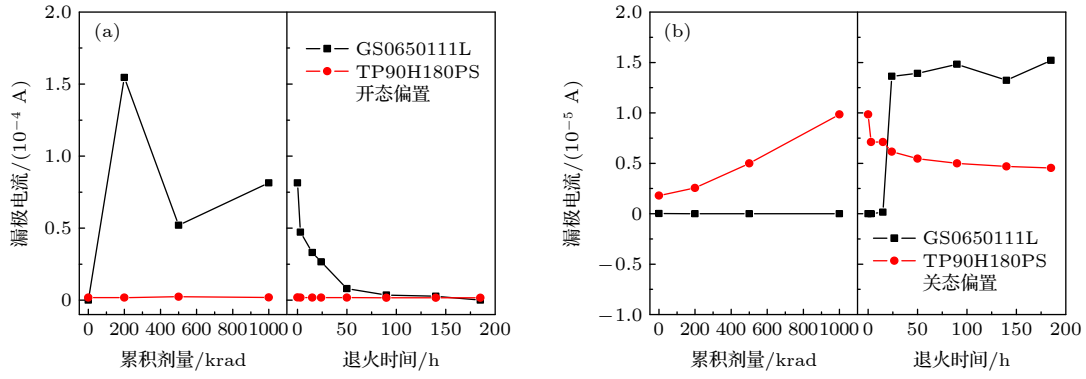


图 6 器件漏极电流随辐照累积剂量及退火时间 (168 h) 的变化 (a) 开态偏置; (b) 关态偏置

Fig. 6. The variations of drain current with cumulative dose and annealing time: (a) On-state bias; (b) off-state bias.

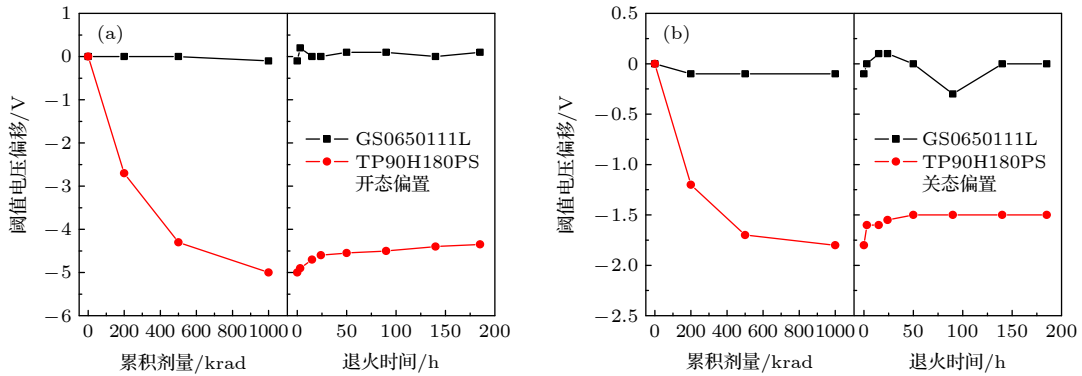


图 7 器件阈值电压随辐照累积剂量及退火时间 (168 h) 的变化关系 (a) 开态偏置; (b) 关态偏置

Fig. 7. The variations of threshold voltage with cumulative dose and annealing time: (a) On-state bias; (b) off-state bias.

向偏移约为 5 V, GS0650111L 器件阈值电压基本保持不变. 当经过 168 h 室温退火后, TP90H180PS 器件的阈值电压仍处于负向偏移状态, 器件的功能出现异常. 当器件工作在关态偏置条件下, 由图 7(b) 可见, 辐照累积剂量增加到 1 Mrad(Si) 时, TP90H180PS 器件的阈值电压负向偏移量约为 1.7 V, 且经 168 h 的退火仍未恢复, 此时器件的功能异常, GS0650111L 器件随着辐照累积剂量增加, 其阈值电压基本保持不变.

4 讨论

4.1 单粒子效应

从图 4 中在不同 LET 值辐照下, TP90H180PS 和 GS0650111L 器件漏端和栅端电流随时间的变化可以发现, 相对于 p 型栅结构, Cascode 结构的 GaN 器件对单粒子效应更加敏感. 在 LET 值为 $22 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的粒子辐照下, TP90H180PS 器件工作电压从 900 V 衰减到 50 V, 下降近 95%,

此时器件的漏极电流出现明显的增大, 而栅极电流基本保持不变.

重离子辐照后, TP90H180PS 器件在关态模式下, 器件的栅、漏电流随漏端电压的变化如图 8 所示. 可以看到, 器件的栅极电流仍保持在纳安量级, 即器件的栅源端处于截止状态, 而随着漏极电压增加, 器件的漏极电流在不断增大, 即表明器件漏源区域之间存在导电通道. 进一步对图 9(a) 所示的 Cascode GaN 器件内部电路结构分析可得, TP90H180PS 型 GaN 器件电路由低压增强型 Si MOSFET 和高压耗尽型 GaN HEMT 共源极、共栅极级联组成. 当器件处于反偏截止状态时, 低压增强型 Si MOSFET 截止, 高压耗尽型 GaN HEMT 的漏极、栅极以及 Si MOSFET 的源极可形成 TP90H180PS 器件的源漏漏电路径, 导致器件源漏端出现大电流现象, 这可能是图 5 中 TP90H180PS 器件 SEB 区域主要在高压耗尽型 GaN HEMT 的主要原因. 此外, 分析图 9 所示的耗尽型 GaN HEMT 的剖面结构^[14] 可以发现, GaN 器件

的源端、栅端和漏端通过 AlGa_N 势垒层和 Ga_N 沟道层隔离 (二者之间形成了二维电子气). 由于 Ga_N 器件栅源端接地, 内部 Si MOSFET 处于截止状态, 在耗尽型 Ga_N HEMT 和 Si MOSFET

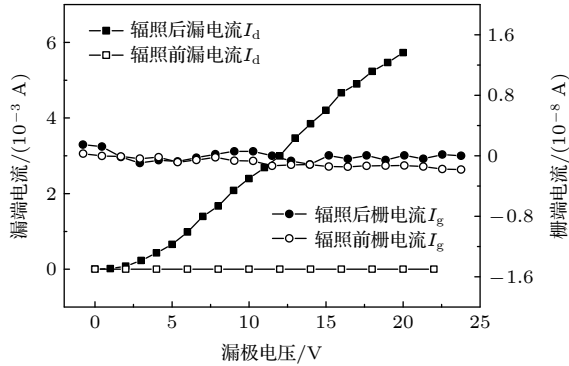


图 8 重离子辐照后关态模式下 Cascode 器件的栅漏电流随漏极电压的变化

Fig. 8. The variations of gate/drain current with drain voltage for Cascode device in off-state mode after heavy ion irradiation.

G₋Si 及 D₋Si 构成的电流路径上电流极小, 即 Ga_N 器件栅极电流很小. 当重离子入射耗尽型 Ga_N HEMT 时, 在粒子入射的径迹上势必产生大量的电子空穴对, 由于耗尽型 Ga_N HEMT 的漏栅极之间存在高压偏置, 导致辐射诱发的载流子向器件 AlGa_N 层不断注入, 随着辐射诱发的电子浓度在 AlGa_N 势垒层中不断积累, 栅电极与半导体形成的肖特基势垒宽度不断减小, 促使辐射诱发的电子隧穿栅势垒^[15–17], 形成耗尽型 Ga_N HEMT 的漏端、栅端和 Si MOSFET 源端的大电流路径, 与图 5(b) 中耗尽型 Ga_N 器件栅漏端之间出现 SEB 的现象一致.

p 型栅结构 Ga_N HEMT 的剖面结构如图 10 所示. 二维电子气存在于 AlGa_N 势垒层和 Ga_N 沟道层之间, 通过施加栅极电压控制 p 型 Ga_N 和 n 型 AlGa_N 形成 PN 结的导通与截止, 实现 Ga_N HEMT 的开关特性. 当重离子入射 Ga_N HEMT

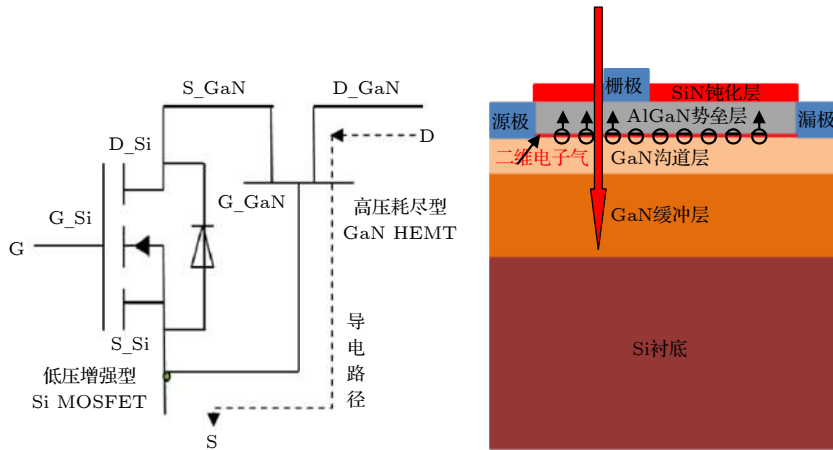


图 9 (a) Cascode 型 Ga_N HEMT 电路结构原理图; (b) 耗尽型 Ga_N HEMT 的剖面示意图

Fig. 9. (a) The circuit schematic diagram of Cascode type Ga_N HEMT device; (b) the cross-section diagram of the depletion type Ga_N HEMT.

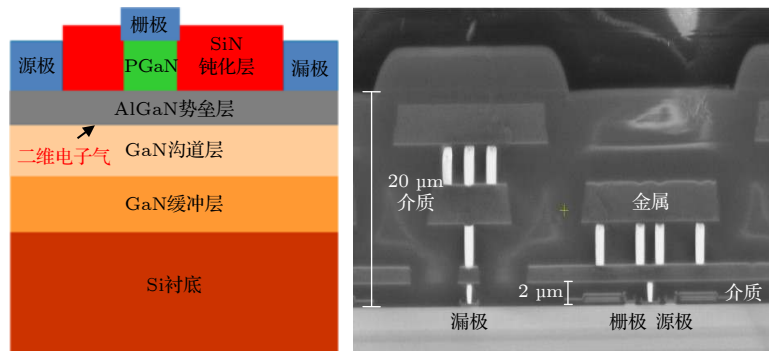


图 10 p 型栅 Ga_N HEMT 的剖面示意图

Fig. 10. The cross-section diagram of the p-type gate Ga_N HEMT.

时, 辐射诱发的电子相对较难连续穿过 AlGaIn 势垒层和 p 型 GaN, 形成类似耗尽型 GaN HEMT 的栅漏端大电流通路. 相关的研究报道发现, 单粒子入射 p 型栅 GaN HEMT 可能会导致器件 AlGaIn 势垒层局部出现缺陷, 造成器件源漏端漏电流增大. 当漏电流增大到一定的程度时, 会导致器件的介质层被击穿, 进而出现大电流现象. 但通过聚焦离子束扫描技术 (focused ion beam, FIB) 发现, GS065-0111L 器件的介质层厚度远大于 $1\ \mu\text{m}$, 较难被单粒子辐射感生载流子形成的电场击穿, 这可能是 p 型栅结构 GaN HEMT 单粒子烧毁 LET 阈值相对较高的原因.

4.2 总剂量效应

分析图 6 和图 7 可发现, 与国内外相关 GaN HEMT 的总剂量实验研究报道相一致, p 型栅结构的 GS0650111 L 型 GaN 器件具有较强抗总剂量效应能力, 在辐照总剂量累积到 $1\ \text{Mrad}(\text{Si})$ 时, 在开态和关态偏置条件下, 器件的漏电流和阈值电压基本保持不变. 室温退火时, 器件的漏电流略有增加, 但器件的输出和转移功能正常. 由图 9(b) 和图 10(a) 中所示的 GaN HEMT 剖面图可发现, GaN HEMT 主要通过 AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道层之间极化的二维电子气漂移扩散产生电流, 不存在栅氧化层工艺, 总剂量效应主要通过 p 型 GaN 和 SiN 钝化层界面或 AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道层界面处产生额外的感生界面陷阱电荷, 进而影响器件的性能参数与功能^[18]. 由于 GaN HEMT 界面层厚度较薄且界面陷阱电荷迁移率较低, 极大地抑制了总剂量辐射诱发电荷的数量和作用范围, 这可能是 p 型栅结构 GaN HEMT 对总剂量辐射不敏感的主要原因. 此外, 由于总剂量效应累积剂量较高, 总剂量辐射感生的界面陷阱在室温退火时可能会继续增长, 进而造成器件漏极电流增加^[19].

与 p 型栅 GaN HEMT 的总剂量辐射响应特征相反, Cascode 结构的 TP90H180PS 型 GaN HEMT 在开态和关态偏置条件下, 均表现出对总剂量效应较为敏感. 在开态偏置条件下, 当辐照总剂量累积到 $200\ \text{krad}(\text{Si})$ 时, 器件的漏电流和阈值电压出现明显增加; 在关态偏置条件下, 器件的漏电流在累积剂量为 $500\ \text{krad}(\text{Si})$ 时显著增加, 器件功能出现异常. 分析 TP90H180PS 型 GaN HEMT

的内部电路结构可知, 器件漏电流、阈值电压、开关频率等性能参数均受低压 NMOSFET 的影响. 众所周知, 商用 Si NMOSFET 对总剂量效应非常敏感, 通常会造成器件的漏电流增加和阈值电压负向偏移^[20]. 这可能是总剂量效应导致 TP90H180-PS 型 GaN 器件漏电流增加和阈值电压负向偏移的主要原因.

5 结 论

本文利用重离子加速器和 ^{60}Co γ 射线实验装置, 分别开展了 p 型栅和 Cascode 结构增强型 GaN HEMT 的单粒子效应和总剂量效应实验研究. 研究获得了不同结构 GaN HEMT 的单粒子效应响应特征及安全工作区域, 获得了不同工作模式下, 不同结构 GaN HEMT 的总剂量效应表现特征与规律. 值得注意的是, 研究发现 p 型栅结构 GaN HEMT 具有较强的抗单粒子和总剂量能力, 但是 Cascode 结构的 GaN HEMT 对单粒子效应和总剂量效应均很敏感. 实验研究揭示了单粒子辐射诱发耗尽型 GaN HEMT 栅极肖特基势垒发生电子隧穿可能是导致 Cascode 结构 GaN HEMT 出现 SEB 的内在机制, 以及 Si NMOSFET 是导致 Cascode 结构 GaN HEMT 对总剂量效应敏感的可能原因.

参考文献

- [1] Scheick L Z 2017 *Proceedings of the 19th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems Geneva*, Switzerland, October 2–6, 2017 pp 1–7
- [2] Bazzoli S, Girard S, Ferlet-Cavrois V, Baggio J, Paillet P, Duhamel O 2007 *Proceedings of the 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems Deauville*, France, September 10–14, 2007 pp1–5
- [3] Guo W L, Chen Y F, Li S Y, Lei L, Bai C Q 2007 *Chinese J. Lumin.* **38** 760 (in Chinese) [郭伟玲, 陈艳芳, 李松宇, 雷亮, 柏常青 2007 发光学报 **38** 760]
- [4] He L, Liu Y 2016 *J. Power Supply* **14** 1 (in Chinese) [何亮, 刘扬 2016 电源学报 **14** 1]
- [5] Martinez M J, King M. P, Baca A G, Aller-man A A, Armstrong A A, Klein B A, Douglas E A, Kaplar R J, Swanson S E 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 344
- [6] Onoda S, Hasuiki A, Nabeshima Y, Sasaki H, Yajima K, Sato S I, Ohshima T 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4446
- [7] Mizuta E, Kuboyama S, Nakada Y, Takeyama A, Ohshima T, Iwata Y, Suzuki K 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1956
- [8] Gu W P, Zhang J C, Wang C, Feng Q, Ma X H, Hao Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1161 (in Chinese) [谷文萍, 张进城, 王冲, 冯倩, 马晓华, 郝跃 2009 物理学报 **58** 1161]

- [9] Xiao S, Saadat O I, Chen J, Zhang E X, Cui S, Palacios T, Fleetwood D M, Ma T P 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4074
- [10] Dong S J, Guo H X, Ma W Y, Lv L, Peng X Y, Lei Z F, Yue S Z, Hao R J, Ju A A, Zhong X L, Ouyang X P 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 078501 (in Chinese) [董世剑, 郭红霞, 马武英, 吕玲, 潘霄宇, 雷志锋, 岳少忠, 郝蕊静, 琚安安, 钟向丽, 欧阳晓平 2020 物理学报 **69** 078501]
- [11] Jiang R, Zhang E X, Mccurdy M W, Wang P, Gong H, Yan D, Schrimpf R D, Fleetwood D M 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 170
- [12] Aktas O, Kuliev A, Kumar V, Schwindt R, Toshkov S, Costescu D, Stubbins J, Adesida I 2004 *Solid State Electron.* **48** 471
- [13] Zhang M L, Yang R X, Li Z X, Cao X Z, Wang B Y, Wang X H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 117103 (in Chinese) [张明兰, 杨瑞霞, 李卓昕, 曹兴忠, 王宝义, 王晓辉 2013 物理学报 **62** 117103]
- [14] Wrobel F, Touboul A D, Pouget V, Dilillo L, Boch J, Saigne F 2017 *Microelectron Reliab.* **76** 644
- [15] Rowena I B, Selvaraj S L, Egawa T 2011 *IEEE Electron Device Lett.* **32** 1534
- [16] Khachatryan A, Roche N J H, Buchner S P, Koehler A D, Greenlee J D, Anderson T J, Warner J H, McMorow D 2016 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63** 1995
- [17] Zerarka M, Austin P, Bensoussan A, Moranco F, Durier A 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2242
- [18] Scheick L 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 2881
- [19] Oldham T, Mclean F 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 483
- [20] Fleetwood D M 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1465

Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays*

Chen Rui^{1)2)†} Liang Ya-Nan¹⁾ Han Jian-Wei¹⁾²⁾ Wang Xuan¹⁾²⁾
 Yang Han¹⁾²⁾ Chen Qian¹⁾²⁾ Yuan Run-Jie¹⁾²⁾ Ma Ying-Qi¹⁾²⁾
 Shangguan Shi-Peng¹⁾

1) (*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 1 December 2020; revised manuscript received 31 December 2020)

Abstract

The single event effect (SEE) and the total ionizing dose (TID) effect of a commercial enhancement mode gallium nitride (GaN) high electron nobility transistor (HEMT) with p-type gate structure and cascode structure are studied by using the radiation of heavy ions and ⁶⁰Co gamma in this paper. The safe operating areas of SEE, the sensitive parameters degradation of TID effect and the SEE and TID characteristics of GaN HEMT device are respectively presented. The experimental results show that the SEE and TID effect have less influence on the p-type gate GaN device. The linear energy transfer (LET) threshold of the single event Burnout effect (SEB) is higher than 37 MeV·cm²/mg and the failure threshold of TID effect is above 1M rad (Si) for p-type gate GaN device. However, the GaN HEMT device with cascode structure is much more sensitive to SEE and TID effect than p-type gate GaN device. Under heavy ions at LET of 22 MeV·cm²/mg and a cumulative dose of 200 krad (Si), the SEB phenomenon and parameters-degradation of cascode-type GaN HEMT are respectively observed. Besides, the circuit structure of the cascode-type GaN HEMT device is analyzed by using metallographic microscope imaging and focused ions beam technology. It reveals the possible reason why it is sensitive to SEB and TID for cascode-type GaN HEMT. These results show that the extra carriers caused by heavy ion radiation can tunnel the Schottky barrier formed by gate metal and AlGaN layer, leading to a large source-drain current in GaN HEMT device. Meanwhile, it is shown that the metal oxide semiconductor field-effect transistor in cascode circuit for TP90H180PS GaN HEMT may be the main reason why the cascode-type GaN HEMT is sensitive to TID.

Keywords: single event burnout effect, total dose effect, heavy ion, gallium nitride high electron mobility transistor

PACS: 61.80.Jh, 85.30.De, 73.40.Qv

DOI: 10.7498/aps.70.20202028

* Project supported by the Beijing Municipal Science and Technology Commission, China (Grant No. E039360101) and the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XDA17010301).

† Corresponding author. E-mail: ch.ri.520@163.com