

增强型 Cascode 结构氮化镓功率器件的高能质子辐射效应研究

白如雪¹⁾ 郭红霞^{2)†} 张鸿¹⁾ 王迪²⁾ 张凤祁²⁾ 潘霄宇²⁾
马武英²⁾ 胡嘉文¹⁾ 刘益维¹⁾ 杨业²⁾ 吕伟²⁾ 王忠明²⁾

1) (湘潭大学材料与工程学院, 湘潭 411105)

2) (西北核技术研究所, 西安 710024)

(2022 年 8 月 12 日收到; 2022 年 8 月 31 日收到修改稿)

针对增强型共栅共源 (Cascode) 级联结构和耗尽型 AlGaIn/GaN 功率器件, 利用 60 MeV 能量质子开展辐射效应研究. 获得了经质子辐照后器件电学性能的退化规律, 并与常规耗尽型 HEMTs 器件辐照后的电学性能进行了比较, 发现增强型 Cascode 结构器件对质子辐照更加敏感, 分析认为级联硅基 MOS 管的存在是其对质子辐照敏感的主要原因. 质子辐照使硅基 MOS 管栅氧化层产生大量净的正电荷, 诱导发生电离损伤效应, 使其出现阈值电压负向漂移及栅泄漏电流增大等现象. 利用等效 (60 MeV 能量质子, 累积注量 1×10^{12} p/cm²) 剂量的 ⁶⁰Co γ 射线辐射器件得到电离损伤效应结果, 发现器件的电学性能退化规律与 60 MeV 能量质子辐照后的退化规律一致. 通过蒙特卡罗模拟得到质子入射在 Cascode 型器件内诱导产生的电离能损和非电离能损, 模拟结果表明电离能损是导致器件性能退化的主要原因.

关键词: 增强型 AlGaIn/GaN HEMT, 质子辐照, 电离能损

PACS: 24.10.Lx, 71.55.Eq, 78.70.-g

DOI: 10.7498/aps.72.20221617

1 引言

作为第三代宽禁带半导体材料的典型代表之一, 氮化镓 (GaN) 是一种直接带隙的半导体材料, 其在室温下的禁带宽度为 3.4 eV^[1-3]. 氮化镓材料具有优异的材料特性, 包括大的临界击穿电压、大的电子饱和漂移速度和高热导率等, 这也使得氮化镓基器件在高频、大功率应用方面具有巨大潜力^[4-6]. 同时, 相比于 GaAs 材料和 Si 材料, GaN 材料的宽禁带特性使其理论上抗辐射性能更好, 在航空航天领域前景可观^[7-8].

质子是太阳宇宙射线和银河宇宙射线的主要组分, 质子辐射对氮化镓基器件的影响不容忽视.

近年来, 国内外研究者针对 AlGaIn/GaN HEMT 器件的辐照损伤效应开展了一些研究^[9-16]. Keum 等^[9]开展了增强型 p-gate AlGaIn/GaN HEMT 器件的 5 MeV 质子辐照实验, 辐照损伤导致器件的阈值电压负向漂移、饱和漏电流降低, 分析认为这是由于辐照使 p-gate 栅层空穴浓度降低所致; Wan 等^[10]研究了低能质子辐照对商用增强型 p-gate 氮化镓器件的影响, 在不同偏压下, 3.8 MeV 质子辐照使器件阈值电压负向漂移、跨导减小, 分析认为这些退化是因质子入射在 AlGaIn, AlGaIn/GaN 界面或 AlGaIn 缓冲层引入缺陷所引起的; 吕玲等^[11]利用 70 keV 和 140 keV 质子辐照增强型 AlGaIn/GaN HEMTs 绝缘栅器件, 辐照导致器件阈值电压正向漂移, 饱和漏电流急剧减小, 栅泄漏电流增大, 分

† 通信作者. E-mail: guohxnint@126.com

析认为质子辐照在该器件沟道层、栅介质层及栅介质/势垒层界面引入了不同程度的缺陷, 绝缘栅的存在使器件对质子辐照更敏感; Floriduz 等^[12]利用 24 GeV/C 质子辐照增强型混合漏极嵌入式栅极 (HD-GIT) AlGaIn/GaN 晶体管, 辐照导致晶体管饱和漏电流减小, 阈值电压有微小的负漂, 分析认为是质子辐照引入了缺陷. 目前针对增强型氮化镓功率器件的质子辐射效应研究较少, 商用的增强型氮化镓功率器件主要有 Cascode 型氮化镓功率器件、增强型绝缘栅 (MIS-HEMTs) 器件、增强型 p-gate 氮化镓功率器件. 同时, 对氮化镓器件的辐射效应研究主要集中在低能质子部分, 有实验研究发现质子能量越小, 器件因辐照损伤性能下降地越严重^[17], 但中高能质子辐照会使器件产生电离能损和非电离能损, 电离能损对氮化镓器件造成的性能损坏同样不可忽视.

本文利用 60 MeV 能量的质子, 对增强型 Cascode 结构和耗尽型 AlGaIn/GaN 功率器件开展了辐照实验. 主要研究高能质子辐照对器件直流特性的影响, 通过计算机仿真软件模拟得到辐照诱导的电离能损和非电离能损, 并利用等效剂量的 ⁶⁰Co γ 射线辐照器件得到电离损伤效应结果. 为增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件在极端辐射环境中的应用提供理论基础.

2 实验

本实验选用的样品是共栅共源 (Cascode) 结构增强型 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 该器件由高压耗尽型 GaN HEMT 和低压增强型 Si MOSFET 级联构成, 器件结构如图 1 所示. 该器件不加栅压且漏源电压大于零时, 工作在正向阻断模式; 当栅

压大于 Si 基 MOS 管的阈值电压时, 器件正向导通; 一旦 Si 基 MOS 管反向导通, 器件将工作在反向导通模式. 又因为 Si 基 MOS 管的漏源电压 V_{ds_Si} 给 GaN HEMT 的栅源电压 V_{gs_GaN} 提供负偏置电压, 因此控制 Si 基 MOS 管的通断即可控制 GaN HEMT 的通断, 从而实现常闭特性^[18]. 由于硅基 MOS 管的引入, 器件具有更大的与驱动电路兼容的栅压浮动, 应用范围更加广泛. 图 2 为器件开封装图.

利用西安 200 MeV 质子应用装置开展增强型 Cascode 结构和耗尽型 AlGaIn/GaN 功率器件质子辐照实验, 利用该装置引出 60 MeV 的准单能质子束流, 质子注量达到 1×10^{12} p/cm² 即停止辐照. 辐照过程中, 器件的 3 个电极均接地.

3 实验结果与理论分析

3.1 实验结果

利用半导体参数分析仪 Agilent B1500, 对质子辐照前后的样品进行离线电学性能测试, 通过直流特性曲线获得器件阈值电压、最大跨导及栅泄漏电流等电学参数^[19]. 发现增强型 Cascode 结构氮化镓器件的电学特性在质子辐照后有明显退化. 辐照前后的转移特性曲线如图 3 和图 4 所示.

通常, 在转移特性曲线上, 选择跨导线密度最大值处做切线, 该切线与横轴的交点所对应的电压称为阈值电压^[19]. 图 3 给出了经 60 MeV 能量质子辐照后, 器件的阈值电压及跨导变化. 从图 3 可见, 质子辐照后, 器件阈值电压出现明显负向漂移, 由 4.2 V 减小至 3.0 V, 漂移了 1.2 V, 跨导峰值由 0.324 S/mm 降至 0.260 S/mm, 降低了约 19.75%; 从图 4 可见, 器件栅正向泄漏电流略微上升.

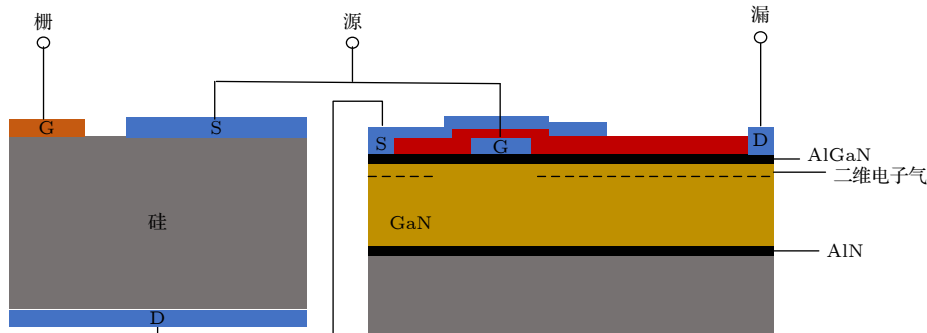


图 1 增强型 Cascode GaN HEMT 器件结构图

Fig. 1. Structure diagram of enhanced Cascode GaN HEMT device.

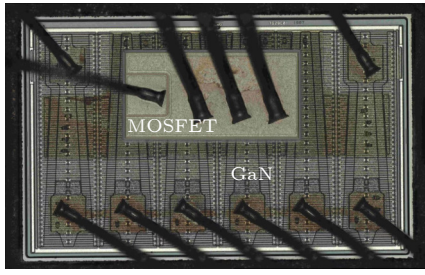


图 2 增强型 Cascode 结构氮化镓器件开封装图

Fig. 2. Internal equivalent circuit diagram of enhanced Cascode structure.

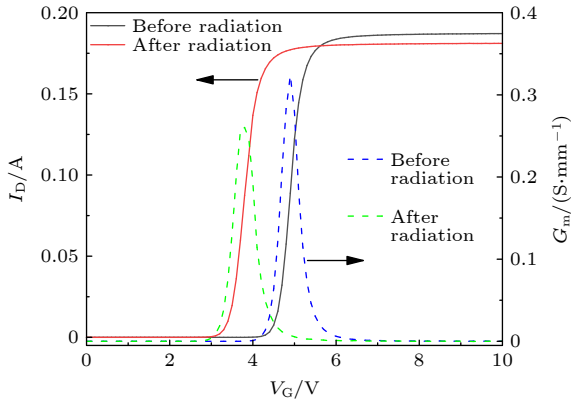


图 3 质子辐照前后增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件阈值电压及跨导曲线

Fig. 3. Threshold voltage and transconductance curve of AlGaIn/GaN HEMT devices of enhanced Cascode structure before and after proton irradiation.

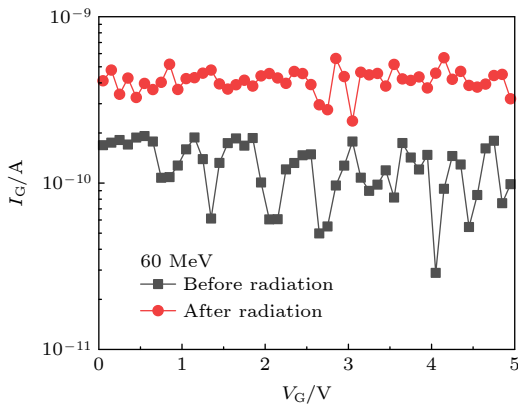


图 4 质子辐照前后增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件栅泄漏电流曲线

Fig. 4. Gate leakage current profile of AlGaIn/GaN HEMT devices with enhanced Cascode structure before and after proton irradiation.

图 5 和图 6 给出了 60 MeV 质子辐照前后, 耗尽型 AlGaIn/GaN HEMT 器件的转移特性曲线, 从图中可以看出质子辐照对耗尽型氮化镓器件几乎没有影响.

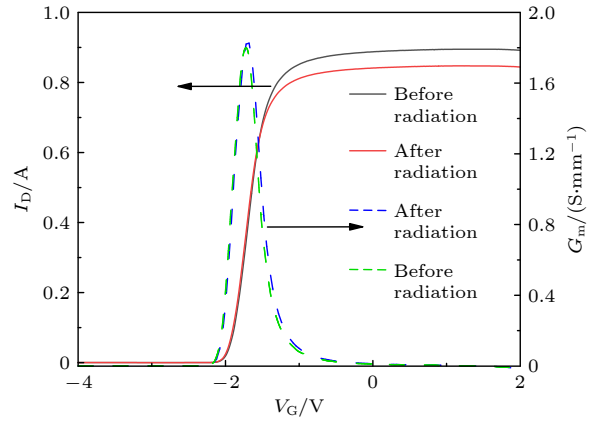


图 5 质子辐照前后耗尽型 AlGaIn/GaN HEMT 器件阈值电压及跨导曲线

Fig. 5. Threshold voltage and transconductance curve of depleted AlGaIn/GaN HEMT devices before and after proton irradiation.

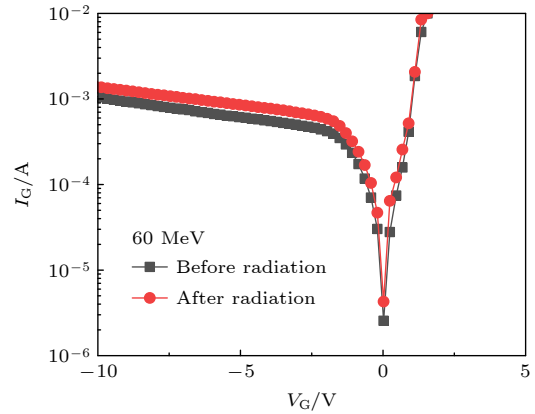


图 6 质子辐照前后耗尽型 AlGaIn/GaN HEMT 器件栅泄漏电流曲线

Fig. 6. Gate leakage current profile of depleted AlGaIn/GaN HEMT devices before and after proton irradiation.

图 7 所示为等效 (60 MeV 能量质子, 累积剂量 1×10^{12} p/cm²) 剂量的 ⁶⁰Co γ 射线辐照 Cascode 型器件转移特性曲线变化, 等效转换公式为

$$\text{TID} = 1.6 \times 10^{-5} \times \text{LET} \times \text{Proton Flux}. \quad (1)$$

质子能量为 60 MeV 时, 其 LET 值为 0.0086 MeV·cm²/mg, 当剂量达到 1×10^{12} p/cm² 时, 电离总剂量为 137.6 krad(Si), 剂量率为 50 rad(Si)/s. 从图 7 可见, 经 ⁶⁰Co γ 射线辐照后, 器件阈值电压由 4.15 V 减小到 2.15 V, 负向漂移了 2 V; 跨导峰值由 0.335 S/mm 降至 0.300 S/mm, 降低了约 10.45%. 与质子辐照实验结果相比 (图 3), ⁶⁰Co γ 射线辐照也会导致器件阈值电压负向漂移, 且漂移的更加严重, 跨导也出现明显下降.

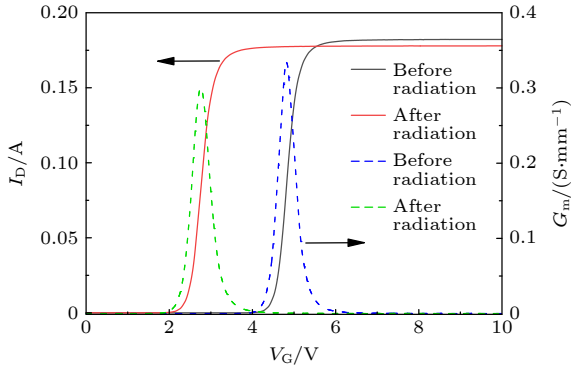


图 7 ^{60}Co γ 射线辐照前后增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件阈值电压及跨导曲线

Fig. 7. Threshold voltage and transconductance curve of AlGaIn/GaN HEMT devices of enhanced Cascode structure before and after ^{60}Co γ -ray irradiation.

3.2 实验分析

通过对增强型与耗尽型器件质子辐照前后的电学特性变化比较发现, 增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件对质子辐照更为敏感, 分析认为其敏感的主要原因是级联的硅基 MOS 管在质子辐照后退化严重. 由 Cascode 结构的内部等效电路图 (图 8) 可以看出, 该器件最大的特点就是级联了低压增强型 Si MOSFET 器件, 且 Cascode 结构整体阈值电压主要由 Si 基 MOS 管控制. MOSFET 管的阈值电压 V_{th} 数学模型为 [20]:

$$V_{\text{th}} = \frac{q}{C_{\text{OX}}} (N_{\text{it}} - N_{\text{ot}}) + \frac{\sqrt{4\epsilon_{\text{Si}}qN_{\text{A}}\phi_{\text{FP}}}}{C_{\text{OX}}} + 2\phi_{\text{FP}} + \phi_{\text{MS}}, \quad (2)$$

$$\phi_{\text{FP}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_{\text{A}}}{n_{\text{i}}}, \quad (3)$$

其中 N_{ot} 是氧化物陷阱电荷, N_{it} 是界面陷阱电荷, C_{OX} 是单位面积栅氧化层电容, ϵ_{s} 是 Si 的介电常数, N_{A} 是 P 型沟道区域的有效掺杂浓度, ϕ_{FP} 是 P 型衬底的费米势, ϕ_{MS} 是金属半导体功函数差, k 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, n_{i} 是 Si 本征载流子浓度. V_{th} 的负向漂移主要是由于质子辐照在栅氧化层中诱导产生大量电子-空穴对所引起的. 由于电子在氧化层中的迁移率高于空穴, 因此电子能够在较短时间内离开栅氧化层, 而大部分空穴缓慢的移向 SiO_2/Si 界面, 被陷阱俘获形成 N_{ot} 和 N_{it} . 又因为氧化物陷阱俘获电荷的速度比界面陷阱快出几个数量级 [21], 最终导致栅氧化层陷阱电荷 N_{ot} 比界面陷阱电荷 N_{it} 增长的多, 使得 V_{th} 降低.

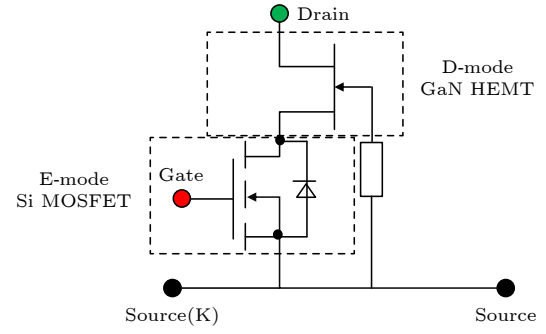


图 8 增强型 Cascode 结构内部等效电路图

Fig. 8. Internal equivalent circuit diagram of enhanced Cascode structure.

跨导 (G_{m}) 则指输出端电流的变化值与输入端电压的变化值之间的比值, 可以表示为 [22]

$$G_{\text{m}} = \frac{\partial I_{\text{DS}}}{\partial V_{\text{GS}}}. \quad (4)$$

G_{m} 数值表示输入端电压 (V_{GS}) 对输出端电流 (I_{DS}) 控制作用的强弱. 跨导峰值的降低可以很好地评价栅区域的损伤程度. 由图 (3) 中跨导可以看出辐照后 Cascode 结构器件栅控能力急剧下降. 如图 4 所示, 栅极泄露电流有所增加, 分析认为, 质子辐照在硅 MOS 管中引入缺陷作为隧穿中心, 加大了栅极电流的隧穿几率.

对于增强型 Cascode 结构氮化镓功率器件而言, 级联的硅基 MOS 管是其重要组成部分, 实验结果表明 MOS 管对电离效应较敏感. 当器件受到高能质子辐照时, 硅基 MOS 管内栅氧化层造成净的正电荷增大使得阈值电压降低, 这也是引发器件电学特性特化的主要原因. 阈值电压的降低使器件的静态功耗增大, 甚至当器件在某个大小的栅压信号下本应表现为关态时, 在辐照后即可开启, 从而导致漏电增加甚至整个系统出现故障. 大幅的阈值电压漂移表明质子辐照严重影响该功率器件的工作能力.

综上, 高能质子辐照导致增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 器件的电学性能出现明显退化, 大幅度的阈值电压漂移说明质子辐照已经对该器件造成严重影响. 高能质子辐照可以诱导产生电离损伤和非电离损伤, 结合总剂量效应实验结果 (图 7) 和上述公式分析, 高能质子辐照产生的电离能损是使器件性能退化的主要原因. 因此, 高能质子辐照诱导产生电离能损对氮化镓器件造成的性能损伤不容忽视.

4 辐射损伤模拟

本节利用仿真模拟软件 SRIM, 计算质子辐照增强型 Cascode 结构氮化镓功率器件, 诱导其产生的电离能损和非电离能损随深度变化情况, 仿真软件采用蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法, 模拟粒子在物质中运动的物理过程. 本次计算采用 10^6 个粒子, 入射质子从靶材表面中心垂直入射. 利用聚焦离子束 (FIB) 对器件进行切片处理, 进一步结合扫描电子显微镜 (SEM) 分析, 最终得到了低压功率 MOSFET 和耗尽型氮化镓的器件结构及各部分材料成分, 根据分析结果 (如图 9 所示) 构建仿真模型.

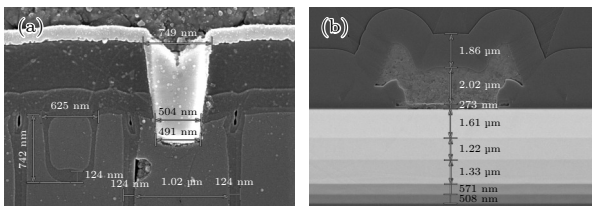


图 9 器件切片分析结果示意图 (a) 增强型硅基 MOS 管; (b) 耗尽型 GaN 晶体管
Fig. 9. Schematic diagram of device slice analysis results: (a) Reinforced silicon-based MOS transistors; (b) depletion-type GaN transistors.

在硅基 MOS 管中, 栅氧化层以及 Si/SiO₂ 界面为电离辐射效应敏感区 [23]; 在 GaN HEMT 中, AlGaIn/GaN 异质结界面为电离辐射效应敏感区 [24]. 仿真计算结果如图 10 和图 11 所示.

从图 10 和图 11 可知, 模拟 60 MeV 质子辐照材料后, 器件内同时产生电离能损和非电离能损. 也可以明显看出, 在器件敏感区部分产生的电离能损远高于非电离能损. 无论是在 Si MOS 还是在氮化镓 HEMT 中, 相同深度下的电离能损都要比非电离能损高 4 个数量级以上, 耗尽型氮化镓 HEMT 器件具有较强的抗电离损伤效应能力 [25], 137.6 krad (Si) 的总剂量对应的电离损伤难以导致器件发生性能退化, 本工作在实验中使用的耗尽型氮化镓 HEMT 器件在质子辐照下也未发生退化. 对于低压 Si MOS, 由于氧化层以及 Si/SiO₂ 界面的存在, 电离损伤诱导的氧化物陷阱电荷及界面态陷阱电荷会对其性能产生显著的影响. 在开展增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件的中高能质子辐照效应实验时, 在较高的质子累积剂量下中高能质子对器件的电离损伤效应不容忽视.

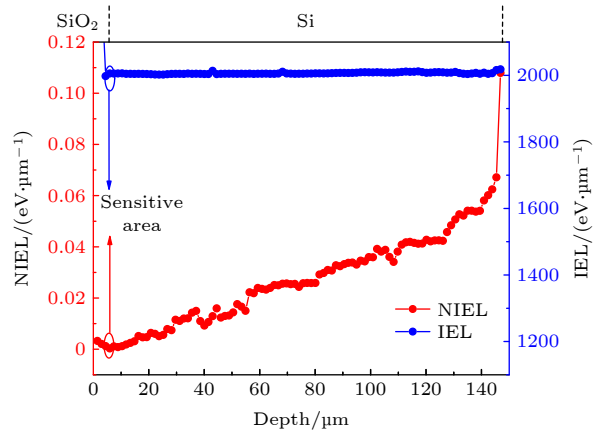


图 10 级联硅基 MOS 管中的电离能损和非电离能损随深度的变化
Fig. 10. Ionization and non-ionization loss in cascaded silicon MOS transistors vary with depth.

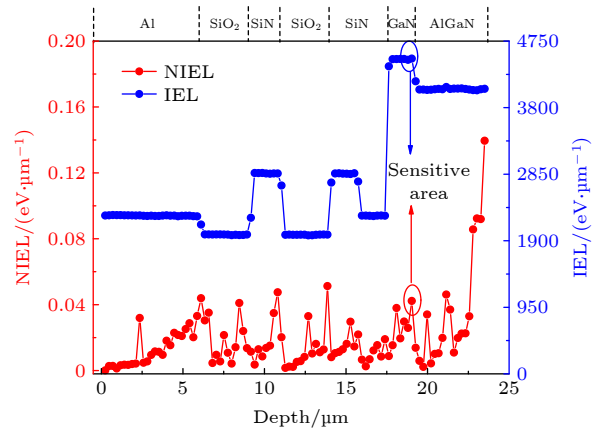


图 11 级联耗尽型 AlGaIn/GaN HEMT 中的电离能损和非电离能损随深度的变化
Fig. 11. Ionization and non-ionization losses in cascaded depleted AlGaIn/GaN HEMT vary with depth.

5 结论

本文实验工作针对增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件开展了质子辐照效应研究, 实验结果表明在 1×10^{12} p/cm² 的质子累积剂量下, 辐照导致 Cascode 型器件阈值电压负向漂移, 由 4.2 V 减小至 3.0 V, 漂移了 1.2 V; 跨导峰值由 0.324 S/mm 降至 0.260 S/mm, 降低了约 19.75%. 与常规耗尽型 AlGaIn/GaN 功率相比, 增强型 Cascode 结构器件因为级联硅基 MOS 管的存在会对质子辐照更加敏感, 质子辐照导致硅基 MOS 管产生电离损伤效应. 利用等效 (60 MeV 能量质子, 累积剂量 1×10^{12} p/cm²) 剂量的 ⁶⁰Co γ 射线辐射器件得到电离损伤效应结果, 发现等效剂量 ⁶⁰Co γ 射线辐

照后,器件的电学性能退化规律与高能质子辐照后的退化规律一致.为进一步验证实验及结论的准确性,通过蒙特卡罗模拟得到辐射在该器件内诱导产生的电离能损和非电离能损,模拟结果表明电离能损诱导硅基 MOS 产生氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷,是增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件性能退化的主要原因.本文的相关研究成果可用于增强型 Cascode 结构 AlGaIn/GaN HEMT 功率器件辐照机理分析及抗辐照加固设计方面.

参考文献

- [1] Chen Z W, Yue S Z, Peng C, Zhang Z G, Liu C, Wang L, Huang Y M, Huang Y, He Y J, Zhong X L, Lei Z F 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 118
- [2] Chen K J, Häberlan O, Lidwo A, Tsai C L, Ueda T, Uemoto Y, Wu Y 2017 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **64** 779
- [3] Karmarkar A P, Jun B, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Weller R A, White B D, Brillson L J, Mishra U K 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3801
- [4] Zhang Z R, Fang Y L, Yin J Y, Guo Y M, Wang B, Wang Y G, Li J, Lu W L, Gao N, Liu P, Feng Z H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 076801 (in Chinese) [张志荣, 房玉龙, 尹甲运, 郭艳敏, 王波, 王元刚, 李佳, 芦伟立, 高楠, 刘沛, 冯志红 2018 *物理学报* **67** 076801]
- [5] Roy T, Zhang E X, Puzyrev Y S, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Choi B K, Hmelo A B, Pantelides S T 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3060
- [6] Wu Y F, Kapolnek D, Ibbetson J P, Parikh P, Keller B P, Mishra U K 2001 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **48** 586
- [7] Jun B, Subramanian S 2001 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **48** 2250
- [8] Gu W P, Hao Y, Yang L A 2010 *Phys. Status Solidi C* **7** 1991
- [9] Keum D M, Sung H, Kim H 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 258
- [10] Wan X, Baker O K, McCurdy M W, Zhang E X, Zafrani M, Wainwright S P, Xu J, Bo H L, Reed R A, Fleetwood D M, Ma T P 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 253
- [11] Lv L, Lin Z Z, Guo H X, Pan X Y, Yan X Y 2021 *Modern Appl. Phys.* **12** 603 (in Chinese) [吕玲, 林正兆, 郭红霞, 潘霄宇, 严肖瑶 2021 *现代应用物理* **12** 603]
- [12] Floriduz A, Devine J D 2020 *Microelectron. Reliab.* **110** 113656
- [13] Meneghini M, Tajalli A, Moens P, Banerjee A, Stockman A, Tack M, Gerardin S, Bagatin M, Paccagnella A, Zanoni E, Meneghesso G 2017 *IEEE Xplore. Res. Appl.* **17** 753
- [14] Keum D M, Cha H, Kim H 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 3362
- [15] Aditya K, Silvestri M, Beck M J, Dixit S K, Ronald D, Reed R A, Fleetwood D M, Shen L, Mishra U K 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3192
- [16] Patrick E, Law M E, Lu L, Cuervo C V, Xi Y Y, Ren F, Pearton S J 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4103
- [17] Kim H Y, Lo C F, Liu L, Ren F, Kim J, Pearton J S 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 1791
- [18] Wu W J, Lan X M 2020 *Appl. Electron. Tech.* **1** 22 (in Chinese) [伍文俊, 兰雪梅 2020 *电子技术应用* **1** 22]
- [19] Shi M, Li M K (translated by Wang M X, Zhao H M) 2021 *Semiconductor Devices Physics and Technology* (3rd Ed.) (Suzhou: Soochow University Press) pp170–176 (in Chinese) [施敏, 李明逵 著 (王明湘, 赵鹤鸣 译) 2021 *半导体器件物理与工艺* (第三版) (苏州: 苏州大学出版社) 第170–176页]
- [20] Tan C Q, Wang D W, Gong M, Ma Y, Yang Z M 2021 *Electron. Packag.* **21** 080402 (in Chinese) [唐常钦, 王多为, 龚敏, 马瑶, 杨治美 2021 *电子与封装* **21** 080402]
- [21] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 1833
- [22] Rajan S, Xing H, Denbaars S, Jena D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1591
- [23] Gao W Y, Yan R L, Yu X F, Ren D Y, Fan L 1992 *J. Semiconduct.* **13** 475 (in Chinese) [高文钰, 严荣良, 余学峰, 任迪远, 范隆 1992 *半导体学报* **13** 475]
- [24] Lv L, Zhang J C, Li L, Ma X H, Cao Y R, Hao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 057202 (in Chinese) [吕玲, 张进成, 李亮, 马晓华, 曹艳荣, 郝跃 2012 *物理学报* **61** 057202]
- [25] Smith M D, O' Mahony D, Vitobello F, Muschitiello M, Costantino A, Barnes A R, Parbrook P J 2016 *Semicond. Sci. Technol.* **31** 025008

High-energy proton radiation effect of Gallium nitride power device with enhanced Cascode structure

Bai Ru-Xue¹⁾ Guo Hong-Xia^{2)†} Zhang Hong¹⁾ Wang Di²⁾ Zhang Feng-Qi²⁾
 Pan Xiao-Yu²⁾ Ma Wu-Ying²⁾ Hu Jia-Wen¹⁾ Liu Yi-Wei¹⁾ Yang Ye²⁾
 Lyu Wei²⁾ Wang Zhong-Ming²⁾

1) (*School of Material Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

(Received 12 August 2022; revised manuscript received 31 August 2022)

Abstract

To ascertain the damage mechanism caused by high-energy proton irradiation to AlGa_N/Ga_N power devices of enhanced Cascode structures, we study the radiation effect of enhanced Cascode structure and depletion AlGa_N/Ga_N power devices by using 60 MeV energy protons in this work. In the case of proton injection reaching 1×10^{12} p/cm², the experimental results show that the threshold voltage of the Cascode type device is negatively drifted, the transconductance decreases, and the peak leakage current increases. The threshold voltage decreases from 4.2 V to 3.0 V, with a decrement of 1.2 V, and the peak transconductance value decreases from 0.324 S/mm to 0.260 S/mm, with a decrement of about 19.75%. There is no significant change after the conventional depleted AlGa_N/Ga_N device has been irradiated. The Cascode-type AlGa_N/Ga_N power device is more sensitive to proton irradiation than the depletion-type AlGa_N/Ga_N device. The Cascode-type device is sensitive to proton irradiation because of its structure connected to a silicon-based MOS tube. Proton irradiation causes the silicon-based MOS gate oxide layer to generate a large amount of net positive charge, induces an ionization damage effect, and causes threshold voltage to negatively drift and the gate leakage current to increase. The equivalent 60 MeV energy protons and cumulative injection of 1×10^{12} p/cm² dose of the ⁶⁰Co γ radiation device is used to obtain the ionization damage effect. It is found that after being irradiated by the equivalent dose ⁶⁰Co γ ray, the device has the threshold voltage decreasing from 4.15 V to 2.15 V, with a negative drift of 2 V; transconductance peak decreases from 0.335 S/mm to 0.300 S/mm, with an approximate decrement of 10.45%. The degradation of the electrical properties of the device after being irradiated by ⁶⁰Co γ ray is consistent with the degradation law after being irradiated by high-energy protons. In order to further verify the experimental accuracy and conclusions, the ionization energy loss and non-ionization energy loss induced by radiation in the device are obtained by Monte Carlo simulation. The simulation results show that the ionization energy loss induces silicon-based MOS to generate oxide trap charge and interfacial state trap charge, which is mainly responsible for the performance degradation of AlGa_N/Ga_N HEMT power devices with enhanced Cascode structure.

Keywords: enhanced AlGa_N/Ga_N HEMT, proton irradiation, ionization energy loss

PACS: 24.10.Lx, 71.55.Eq, 78.70.-g

DOI: 10.7498/aps.72.20221617

† Corresponding author. E-mail: guohxnint@126.com



增强型Cascode结构氮化镓功率器件的高能质子辐射效应研究

白如雪 郭红霞 张鸿 王迪 张凤祁 潘霄宇 马武英 胡嘉文 刘益维 杨业 吕伟 王忠明

High-energy proton radiation effect of Gallium nitride power device with enhanced Cascode structure

Bai Ru-Xue Guo Hong-Xia Zhang Hong Wang Di Zhang Feng-Qi Pan Xiao-Yu Ma Wu-Ying Hu Jia-Wen Liu Yi-Wei Yang Ye Lyu Wei Wang Zhong-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 012401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221617

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221617>

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

质子辐射对永磁合金微观结构演化的研究

Effect of proton irradiation on microstructure evolution of permanent magnet

物理学报. 2018, 67(1): 016104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172025>

质子辐射下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应

Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation

物理学报. 2022, 71(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211838>

质子辐照作用下浮栅单元的数据翻转及错误退火

Data inversion and erroneous annealing of floating gate cell under proton radiation

物理学报. 2022, 71(11): 118501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212405>

具有阻挡层的H等离子体处理增强型p-GaN栅AlGaIn/GaN HEMT研究

Study on H plasma treatment enhanced p-GaN gate AlGaIn/GaN HEMT with block layer

物理学报. 2022, 71(10): 108501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212192>

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

Non-ionization energy loss of proton in different regions in SiC

物理学报. 2018, 67(18): 182401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181095>

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

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

物理学报. 2021, 70(11): 116102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202028>