

GaN 高电子迁移率晶体管器件质子辐照效应

谢永智^{1,2} 崔江维^{1,2} 李小龙^{1,2} 刘默寒^{1,2} 郑齐文^{1,2} 梁晓雯^{1,2} 史成城^{1,2}

王金鹏^{1,2} 郭旗^{1,2} 李豫东^{1,2}

¹(新疆极端环境电子学重点实验室, 特殊环境条件功能材料与器件重点实验室,
中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830000)

²(中国科学院大学 北京 101408)

摘要 本文研究了 p-GaN 栅 GaN HEMT 器件在不同质子能量与辐照偏置条件下的电学退化行为及界面缺陷演化机理。采用 10 MeV 和 60 MeV 质子对两种导通电阻不同的器件进行零偏与加偏辐照试验。结果表明, 质子辐照会引起阈值电压正向漂移、饱和漏电流和跨导下降。且低能量辐照比高能量辐照下器件参数退化更大, 加偏置辐照条件下参数退化大于零偏置辐照条件。低频 1/f 噪声测试定量表征了辐照前后 AlGaIn/GaN 界面缺陷密度的变化, 其变化趋势与器件参数退化具有良好一致性。进一步分析表明, 质子辐照主要通过沟道界面引入电学活性缺陷, 降低二维电子气 (2DEG) 浓度和迁移率, 从而导致器件性能退化。

关键词 p-GaN HEMT, 质子辐照, 1/f 噪声

中图分类号 TN386

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0032

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0032

引用该文:

谢永智, 崔江维, 李小龙, 等. GaN 高电子迁移率晶体管器件质子辐照效应[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0032.

XIE Yongzhi, CUI Jiangwei, LI Xiaolong, *et al.* Proton radiation effects on GaN HEMT devices[J].

Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0032.



Proton radiation effects on GaN HEMT devices

XIE Yongzhi^{1,2} CUI Jiangwei^{1,2} LI Xiaolong^{1,2} LIU Mohan^{1,2} ZHENG Qiwen^{1,2} LIANG Xiaowen^{1,2}

SHI Chengcheng^{1,2} WANG Jinpeng^{1,2} GUO Qi^{1,2} LI Yudong^{1,2}

¹(Xinjiang Key Laboratory of Extreme Environment Electronics, Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environmental Conditions, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830000, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

基金资助: 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题 (2025D04006), 新疆维吾尔自治区重点研发计划资助项目 (2023B01008) 和中国科学院青年创新促进会优秀会员项目

第一作者: 谢永智, 男, 2000 年 12 月出生, 现为中国科学院大学硕士研究生, 集成电路工程专业

通信作者: 崔江维, 博士, 研究员, E-mail: cuijw@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 初稿 2026-03-02; 修回 2026-03-13

Supported by the Open Project of Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2025D04006), the Key Research and Development Program of Xinjiang (2023B01008), and the Youth Innovation Promotion Association CAS

First author: XIE Yongzhi (male) was born in December 2000. Now he is a graduate student at University of Chinese Academy of Sciences, major in integrated circuit engineering

Corresponding author: CUI Jiangwei, doctoral degree, professor, E-mail: cuijw@ms.xjb.ac.cn

Received 02 March 2026; accepted 13 March 2026

ABSTRACT This work systematically investigated the electrical degradation behavior and interface defect evolution mechanisms of p-GaN gate GaN HEMT devices under different proton energies and irradiation bias conditions. Proton irradiation experiments were conducted using 10 MeV and 60 MeV protons on devices with different on-resistances under both unbiased and biased conditions. The results indicate that proton irradiation induces a positive shift in threshold voltage, as well as reductions in saturation drain current and transconductance. Moreover, device parameter degradation is greater under low-energy irradiation than that under high-energy irradiation, and greater under biased irradiation than that under zero-bias irradiation. Low-frequency 1/f noise measurements were employed to quantitatively characterize the evolution of interface trap density at the AlGaIn/GaN interface before and after irradiation, showing strong consistency with the degradation trends of electrical parameters. Further analysis reveals that proton irradiation primarily introduces electrically active defects at the channel interface, which reduce the two-dimensional electron gas (2DEG) concentration and carrier mobility, thereby leading to device performance degradation.

KEYWORDS p-GaN HEMT, Proton irradiation, 1/f noise

CLC TN386

随着空间卫星、太空探测等航天技术的不断发展,对于耐高温、耐高压、大功率、小型化、适应极端辐射环境的功率器件的需求日益明显。与传统的硅(Si)基器件相比,氮化镓高电子迁移率晶体管(GaN HEMT)器件具有更好的耐辐射特性,更高的击穿电压、更低的寄生电容、更高的开关频率以及更高的迁移率。GaN HEMT器件在不进行任何人为掺杂的情况下,仅依赖材料自身的极化即可在器件的AlGaIn/GaN界面产生面密度为 $10^{13} / \text{cm}^2$ 的高浓度二维电子气(2DEG),已成为宽带通信卫星、相控阵雷达等设备中的关键元器件,在航空航天、军事领域中发挥了重要作用。然而,GaN HMET器件空间应用时,会受到高能粒子辐射损伤,其中质子是空间中主要的粒子,同时产生电离损伤与位移损伤,对器件的影响不可忽略。

已有一些关于质子辐照导致GaN器件损伤的文献报道,其中质子辐照的能量是影响GaN HEMT器件性能退化的一个重要因素^[1-2]。不同质子能量对器件的影响具有显著差异,主要表现在质子能量决定了能量沉积的位置和深度,进而影响损伤类型和退化强度^[3]。研究表明,高能质子的能量沉积深度较大,通常会使得辐照损伤较为均匀地分布在器件的整个体材料中,主要影响GaN缓冲层和衬底。然而,这种高能量质子对沟道区域的直接影响较弱^[4-6]。低能质子能量沉积较浅,损伤主要集中在AlGaIn/GaN界面和沟道区域,这使得低能质子对2DEG的影响更加显著,导致器件电学性能更严重的退化^[7-9]。除质子能量外,辐

照偏置电压对质子辐照响应也具有显著影响,尤其是对栅电场和沟道调制效应的增强,偏置电压改变了辐照损伤的表现和退化的程度^[10-12]。在高偏置条件下,器件栅端到漏端之间的电场较强,尤其是在漏极电压较高时,高电场条件下辐照引入的深能级陷阱会更容易被激活,导致更大的退化幅度^[13-15]。在无偏置或低偏置的条件下,器件在质子辐照下的退化程度相对较小。这是因为无偏置条件下,缺陷的激活和电荷俘获较为缓慢,且电场较弱,减少了缺陷对沟道的影响^[16-18]。

质子辐照会在GaN HEMT器件中引入界面缺陷,这些界面缺陷对载流子的捕获和释放是产生1/f噪声的主要原因^[19-20]。1/f噪声可以从微观层面理解缺陷的影响^[21-22],已有研究通过1/f噪声表征了GaN HEMT器件界面处缺陷的增加^[23-24]。这些缺陷不仅改变了材料的结构,还显著影响了器件的电学性能。质子辐照后,氮空位和镓空位等点缺陷在GaN中形成,尤其在高能质子辐照下,空位缺陷是最常见的辐照引入的缺陷类型。氮空位作为深能级施主,增加了二维电子气的散射,导致迁移率下降、跨导减小^[25-26]。质子辐照还会产生一些深能级陷阱,这些陷阱能够俘获载流子,增加材料的电荷俘获截面。这些深能级陷阱的存在不仅会导致阈值电压的漂移,还会对器件的跨导和漏电流产生严重影响,尤其是在较低能量质子的辐照条件下^[27-28]。

目前对GaN HEMT器件质子辐照的研究大多采用低能量质子,未关注不同器件在关态条件、高能质子辐照下不同偏置条件、器件结构对辐射

损伤的影响研究。本文针对不同型号的增强型 p-GaN 栅 GaN HEMT 器件进行了不同条件的质子辐照试验, 获得了质子能量、辐照偏置、器件型号对辐射损伤的影响规律, 发现低能量辐照比高能量辐照下器件参数退化更大, 关态偏置辐照导致的器件损伤大于零偏辐照, 相同条件下导通电阻更低的器件质子辐射导致的参数退化更明显。通过噪声测试表征辐照界面缺陷的变化, 发现器件的噪声功率谱密度符合载流子涨落模型, 通过拟合平带电压密度谱, 得到噪声密度拟合曲线, 提取了质子辐照器件的界面缺陷密度信息, 为 GaN HEMT 器件的空间应用提供了有益参考。

1 试验信息

本研究中使用的所有样品均为 700 V p-GaN 栅 GaN HEMT 器件, 如图 1 所示, 其典型阈值电压为 1.3 V。研究涉及两种型号的器件, 分别具有不同的导通电阻值: A 类器件 (Type A) 为 140 mΩ, B 类器件 (Type B) 为 480 mΩ。在进行质子辐照前, 所有器件均经过开帽处理以确保质子能够到达器件的有效区域, 且开帽后器件参数保持正常。

质子辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所质子加速器中进行。使用的质子能量为 10 MeV 和 60 MeV。质子束流从器件正面垂直入射, 束流覆盖面积为 2 cm×2 cm, 可完全覆盖器件的有效区域。质子辐照在两种偏置条件下进行: (1) 加偏辐照条件, $V_{DS}=300$ V, $V_{GS}=0$ V; (2) 零偏辐照条件, $V_{DS}=V_{GS}=0$ V。注量率为 3×10^8 cm⁻²·s⁻¹, 总注量为 1×10^{12} cm⁻²。对栅极和漏极电流进行实时监测。表 1 为质子辐照试验信息。

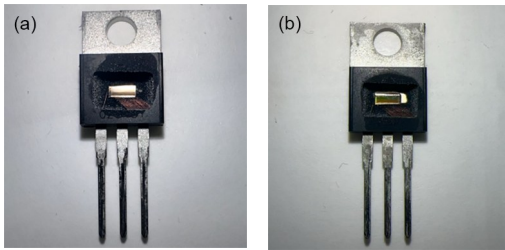


图 1 开封后的器件:
(a) Type A 器件; (b) Type B 器件
Fig. 1 Decapsulated devices:
(a) Type A device; (b) Type B device

在质子辐照前后, 使用 Keithley4200 半导体参数分析仪测量了器件的 $I_{DS}-V_{GS}$ 特性曲线、 $I_{DS}-V_{DS}$ 特性曲线。1/f 噪声数据通过 Agilent 噪声测试系统

获取。此外, 使用 Keithley B1506A 参数分析仪测量了阈值电压 (V_{th})、导通电阻 ($R_{DS(on)}$)、栅极电阻 (R_G)、关态漏电流 (I_{DSS}) 以及栅源漏电流 (I_{GSS})。

表 1 质子辐照试验信息
Table 1 Proton irradiation test information

组别 Group	器件型 号 Type of Device	质子辐照条 件 / V Proton irradi- ation condi- tions	器件数量 Number of device	质子能量 / MeV Proton en- ergy
第 1 组 Group 1	A	$V_{DS}=0, V_{GS}=0$	3	10
第 2 组 Group 2	A	$V_{DS}=300, V_{GS}=0$	3	10
第 3 组 Group 3	B	$V_{DS}=0, V_{GS}=0$	3	10
第 4 组 Group 4	B	$V_{DS}=300, V_{GS}=0$	3	10
第 5 组 Group 5	A	$V_{DS}=0, V_{GS}=0$	3	60
第 6 组 Group 6	A	$V_{DS}=300, V_{GS}=0$	3	60
第 7 组 Group 7	B	$V_{DS}=0, V_{GS}=0$	3	60
第 8 组 Group 8	B	$V_{DS}=300, V_{GS}=0$	3	60

2 结果与讨论

2.1 质子能量的影响

为研究质子能量对器件辐照响应的影响, 在相同辐照偏置条件下, 分别采用 10 MeV 和 60 MeV 的质子能量对器件进行辐照试验。辐照前后, 测试了器件的 $I_{DS}-V_{GS}$ 和 $I_{DS}-V_{DS}$ 。以 Type B 为例, 如图 2 所示, 在两种质子能量辐照下, 器件的 $I_{DS}-V_{GS}$ 均发生了明显退化, 主要表现为: 器件的漏极电流 I_{DS} 明显下降; 阈值电压 V_{th} 发生正向漂移; 曲线斜率减小, 反映出跨导能力的下降。对比不同质子能量辐照后的器件转移特性曲线可以发现, 在相同辐照条件下, 10 MeV 质子辐照引起的 I_{DS} 降低和 V_{th} 正向漂移幅度明显大于 60 MeV 质子辐照, 表明 10 MeV 质子对器件电学性能的影响更加显著。Type A 器件的试验结果与 Type B 器件试验结果一致, 同样显示出 10 MeV 质子辐照后器件损伤大于

60 MeV 质子辐照。其原因在于低能质子辐照中导致器件退化的主要缺陷位于沟道界面附近。而质子能量越高, 能量沉积位置离沟道越远, 所产生

缺陷也越远离沟道界面, 从而对器件电学参数的影响越小。

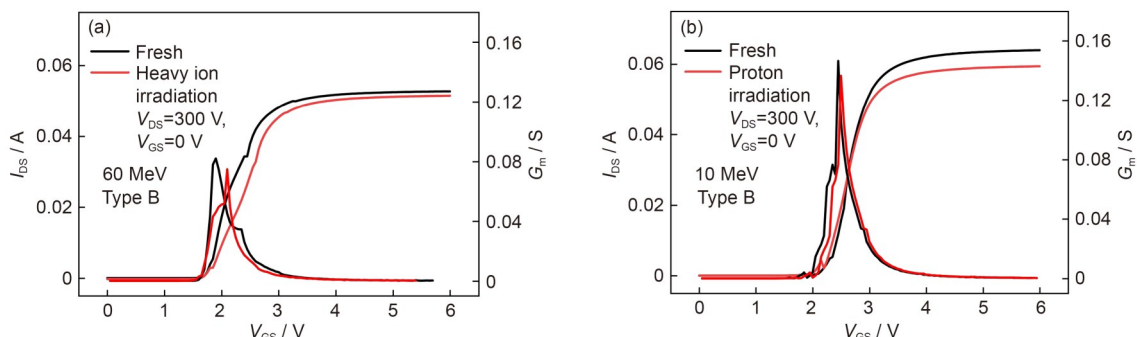


图2 质子辐照前后器件转移特性曲线的变化(彩色见网络版): (a) 60 MeV 质子辐照; (b) 10 MeV 质子辐照
Fig. 2 Variation of the device transfer characteristics before and after proton irradiation: (a) 60 MeV proton irradiation; (b) 10 MeV proton irradiation

图3给出了器件在10 MeV和60 MeV质子加偏辐照条件下, 辐照前后主要静态电学参数的变化情况对比。可以看出, 质子辐照对器件的静态特性产生了明显影响, 且参数退化程度对质子能量具有显著的依赖性。在两种质子能量辐照后, 器件的关键静态参数均出现不同程度的退化。其中, 器件的 I_{DSS} 明显下降, V_{th} 发生正向漂移, 同时 R_{GS} 呈现增大趋势。

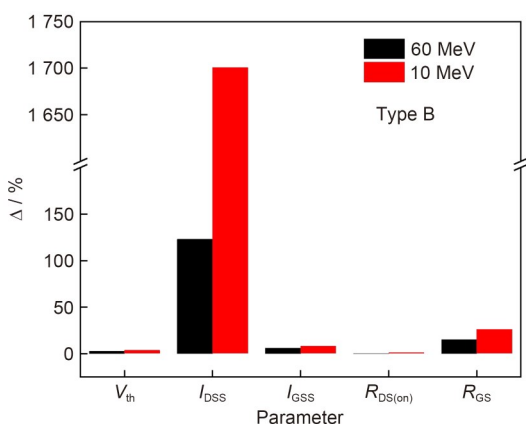


图3 10 MeV和60 MeV质子能量下Type B器件其他参数的变化(彩色件网络版)

Fig.3 Variation of other parameters of Type B devices under 10 MeV and 60 MeV proton irradiation (color online)

对比不同质子能量下的参数变化幅度可以发现, 10 MeV质子辐照引起的器件静态参数退化明显大于60 MeV质子辐照。在10 MeV辐照条件下, 器件 I_{DSS} 的下降幅度更大, R_{GS} 的衰增大也更为明显; 而在60 MeV质子辐照后, 各静态参数虽然同样发生退化, 但整体变化幅度相对较小。上述结果表明, 在相同辐照条件下, 器件在低能量下的损伤更为严重, 器件参数退化更明显。

2.2 偏置电压的影响

为进一步分析辐照偏置条件对质子辐照退化的影响, 在10 MeV质子辐照条件下, 对器件在不同辐照偏置条件下的电学特性曲线变化进行了对比分析。同样以Type B器件为例, 图4展示了在质子辐照过程中分别采用加偏($V_{DS}=300$ V, $V_{GS}=0$ V)和零偏($V_{DS}=V_{GS}=0$ V)辐照偏置条件时, 辐照前后电学参数的退化情况对比。从图中可以看出, 不同辐照偏置条件对器件参数退化程度具有显著影响。在两种辐照偏置条件下, 器件在质子辐照后均表现出不同程度的性能退化, 主要体现在漏极泄漏电流、栅极泄漏电流、阈值电压及栅极电阻等参数的变化。然而, 对比不同偏置条件下的退化幅度可以发现, 加偏辐照条件下器件参数的退化程度明显大于零偏辐照条件。在加偏辐照条件下, 器件的漏极泄漏电流和栅极泄漏电流增大幅度显著增大, 阈值电压漂移更加明显, 同时栅极电阻的增大程度也更为显著; 相比之下, 在零偏辐照条件下, 器件各参数虽同样发生退化, 但整体变化幅度相对较小。此外, 不同参数对辐照偏置条件的敏感性存在差异, 各电学参数在加偏与零偏条件下呈现出不同程度的退化差别, 表明器件在质子辐照过程中的电学退化行为具有明显的偏置依赖性。Type A器件的试验结果与Type B器件试验结果一致, 同样显示出加偏辐照条件下器件损伤大于零偏辐照。这是因为在加偏条件下高漏电压在器件的栅极靠近漏极下方的AlGaN势垒层中产生了强电场, 在这个电场作用下质子辐照损伤作用被放大, 因此加偏辐照条件的器件损伤大于零偏辐照条件的损伤。

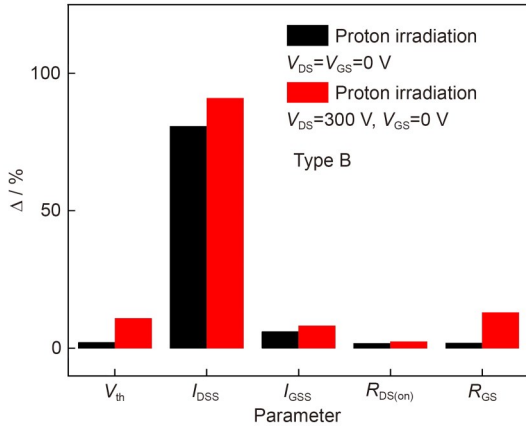


图4 不同偏置应力质子辐照下器件静态参数的退化情况 (彩色见网络版)

Fig.4 Degradation of device static parameters under proton irradiation with different bias stress conditions (coloe online)

2.3 不同型号器件的影响

为进一步分析不同器件对质子辐照退化的影响，以 Type A 和 Type B 器件为研究对象，对比分析了两种器件在 $V_{DS}=300\text{ V}$, $V_{GS}=0\text{ V}$ 的关态偏置应力下 10 MeV 质子辐照前后静态参数的变化量。

如图 5 所示，为两种器件在质子辐照前后静态参数的变化情况，从图中可以看出不同器件在相同的质子辐照条件下的退化差异比较明显，Type A 器件在辐照过程中参数的退化明显大于 Type B 器件，其中参数退化最明显的是漏极泄漏电流 (I_{DSS})、栅极泄漏电流 (I_{GSS}) 和栅极电阻 R_{GS} 。

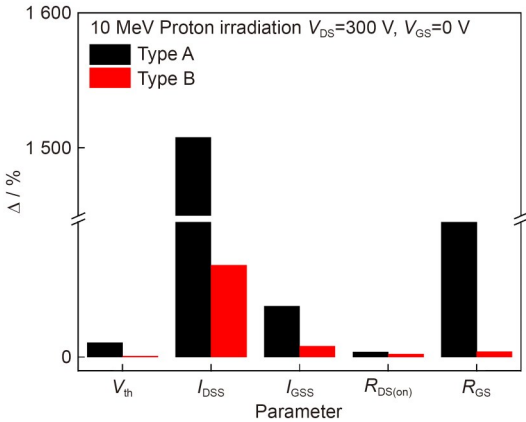


图5 不同器件质子辐照下静态参数的退化情况(彩色见网络版)

Fig.5 Degradation of static parameters of different devices under proton irradiation (coloe online)

Type A 器件和 Type B 除导通电阻外的其他参数均相同，因此认为图 5 中的损伤差异主要与导通电阻有关。Type A 器件的导通电阻 $140\text{ m}\Omega$ ，Type B 器件的导通电阻是 $480\text{ m}\Omega$ ，通过式 (1) 和 (2) 可知电阻与掺杂浓度成反比，说明 Type A 器件的

掺杂浓度更大，更大的掺杂浓度导致器件在质子辐照过程中发生位移损伤的概率更大。在质子辐照过程中，Type A 器件中更容易形成稳定存在的电学活性界面缺陷，导致器件参数的退化幅度更大。1/f 噪声测试结果验证了这一点，辐照后 Type A 器件的界面缺陷密度增幅明显大于 Type B 器件，从而导致其器件参数衰退程度更大。

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{1}{n \cdot q \cdot \mu} \quad (2)$$

2.4 1/f 噪声测试分析

为研究质子辐照所引入缺陷的机理，对器件在辐照前、辐照后进行了 1/f 噪声测试。图 6 展示了未辐照器件在不同栅极电压下的归一化功率谱密度 (S_{id}/I_D^2)。在 10 Hz 频率处，归一化噪声功率谱密度与 S_{vfb} (G_m/I_D)² - I_D 曲线表现出良好的一致性，表明载流子涨落模型能够较好地描述沟道界面附近缺陷对载流子的俘获与释放过程。

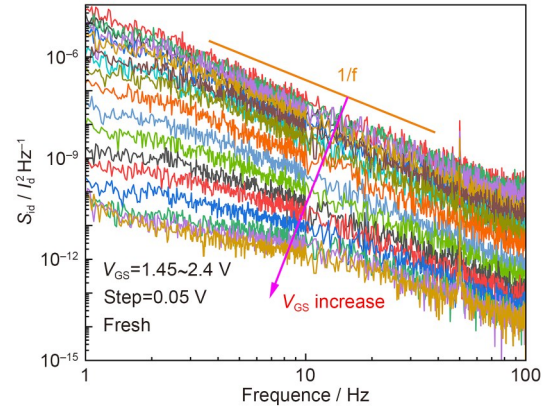


图6 未辐照器件在不同过驱动电压下的功率谱密度
Fig.6 Power spectral density of unirradiated devices under different overdrive voltages

通过对试验数据进行拟合，可以发现 S_{id}/I_D^2 曲线与实测的归一化功率谱密度之间具有良好的一致性，如图 7~10 所示。根据载流子涨落模型， S_{id}/I_D^2 可表示为式 (3) 所示， g_m 为跨导。

$$\frac{S_{id}}{I_D^2} = \left(\frac{g_m}{I_D} \right)^2 S_{vfb} \quad (3)$$

Type A 器件在质子加偏辐照试验之前，提取到的 S_{vfb} 为 $5.83 \times 10^{-12}\text{ V}^2/\text{Hz}$ ；而在质子加偏辐照试验之后，其值为 $6.97 \times 10^{-12}\text{ V}^2/\text{Hz}$ 。Type A 器件在质子零偏辐照试验之前，提取到的 S_{vfb} 为 $1.12 \times 10^{-12}\text{ V}^2/\text{Hz}$ ；而在质子加偏辐照试验之后，其值为 $1.98 \times 10^{-12}\text{ V}^2/\text{Hz}$ 。由于 S_{vfb} 与缺陷密度直接相关，这

表明在辐照过程中器件内部的缺陷数量迅速增加。

Type B 器件在质子加偏辐照实验之前, 提取到的 S_{vfb} 为 $5.23 \times 10^{-11} \text{ V}^2/\text{Hz}$; 而在质子加偏辐照实验之后, 其值为 $1.12 \times 10^{-12} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。Type B 器件在质子零偏辐照实验之前, 提取到的 S_{vfb} 为 $1.14 \times 10^{-11} \text{ V}^2/\text{Hz}$; 而在质子加偏辐照试验之后, 其值为 $1.38 \times 10^{-11} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。

利用式 (4) 对器件界面缺陷进行计算, 得到了 Type A 器件在 10 MeV 质子零偏辐照和加偏辐照下的噪声数据, 如表 2 所示。Type A 器件在 10 MeV 质子加偏辐照前缺陷浓度为 $1.77 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 在质子辐照后缺陷增加至 $3.16 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; Type A 器件在质子零偏辐照前界面缺陷浓度为 $1.62 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 在质子辐照后界面缺陷浓度为

$2.13 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; Type B 器件在 10 MeV 质子加偏辐照前缺陷浓度为 $1.98 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 质子辐照后缺陷浓度为 $2.53 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$; Type B 器件在 10 MeV 质子零偏辐照前缺陷浓度为 $1.91 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 在质子辐照后缺陷浓度为 $2.38 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 。辐照前后缺陷的变化量与图 7~10 中所观察到的器件性能退化现象具有良好的一致性。

$$S_{vfb} = \frac{q^2 k T N_{it}}{W L f C_{\text{AlGaN}}} \quad (4)$$

式中: S_{vfb} 为平带电压功率谱密度, V^2/Hz ; q 为电荷量, C ; k 为波尔兹曼常数, J/K ; T 为绝对温度, K ; N_{it} 为界面陷阱密度, cm^{-2}/eV ; W 为栅极宽度, L 为栅极长度, μm ; f 为低频噪声测试的时选取的测试频率点, Hz 。

表2 质子辐照前后器件界面缺陷的变化
Table 2 Variation of interface defects in devices before and after proton irradiation

组别 Group	辐照前缺陷密度 / cm^{-2} Defect density of the fresh device	辐照后缺陷密度 / cm^{-2} Defect density of the irradiated device	缺陷变化总量 / 10^{14} cm^{-2} Total defect density variation
第1组 Group 1	1.77×10^{14}	3.16×10^{14}	1.39×10^{14}
第2组 Group 2	1.62×10^{14}	2.13×10^{14}	0.51×10^{14}
第3组 Group 3	1.98×10^{14}	2.53×10^{14}	0.55×10^{14}
第4组 Group 4	1.91×10^{14}	2.38×10^{14}	0.47×10^{14}

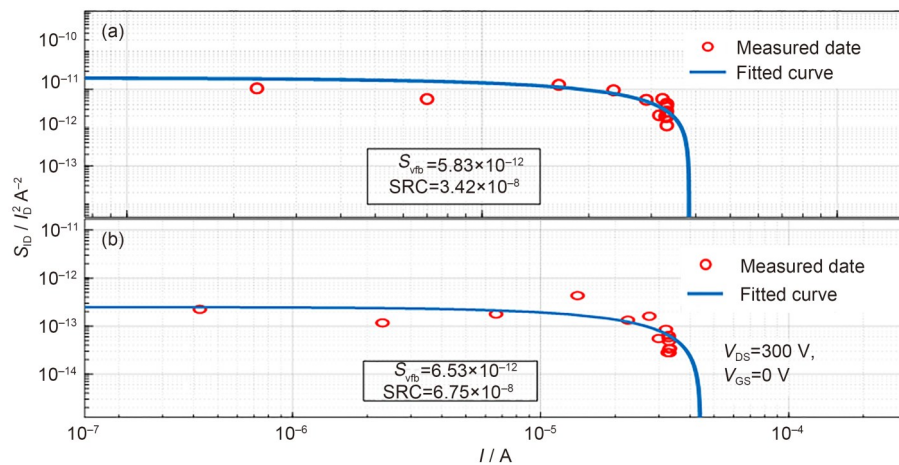


图7 Type A 器件在 10 MeV 质子加偏辐照前后器件的 $1/f$ 噪声特性:(a)未辐照器件;(b)质子辐照后的器件
Fig.7 $1/f$ noise characteristics of Type A devices before and after 10 MeV proton irradiation under biased conditions:
(a) unirradiated device; (b) proton-irradiated device

根据测试结果说明质子辐照主要产生沟道界面缺陷, 这些界面缺陷通过俘获 2DEG 降低沟道载流子的浓度, 并且充当散射中心, 降低载流子的

迁移率, 从而使得器件的漏电流降低, 跨导减小, 导致器件的电学性能发生退化。

器件在加偏辐照下的损伤大于零偏辐照是因

为在加偏条件下高漏电压在器件的栅极靠近漏极下方的 AlGaN 势垒层中产生了强电场，在这个电场作用下质子辐照损伤作用被放大了，因此加偏辐照的器件的损伤大于零偏辐照的损伤。

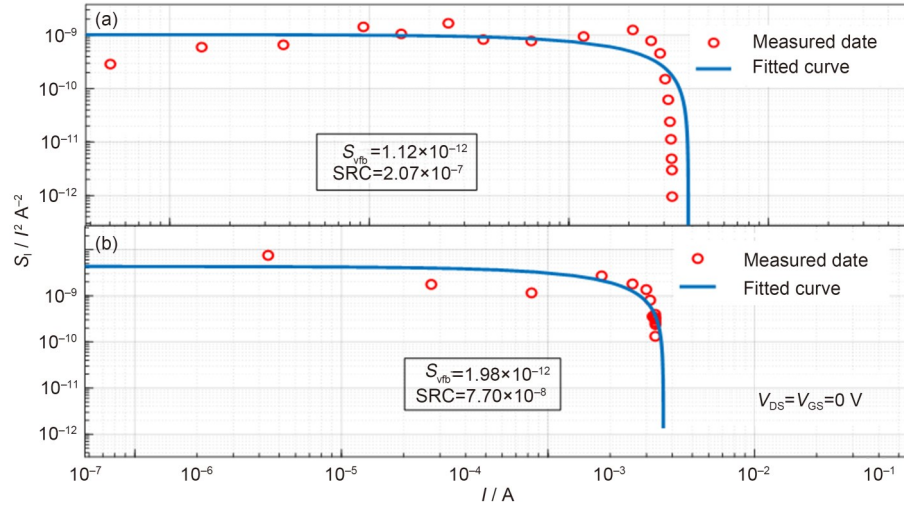


图8 Type A 器件在 10 MeV 质子零偏辐照前后器件的 1/f 噪声特性:(a)未辐照器件;(b)质子辐照后的器件
Fig. 8 1/f noise characteristics of Type A devices before and after 10 MeV proton irradiation under zero-Bias conditions: (a) unirradiated device; (b) proton-irradiated device

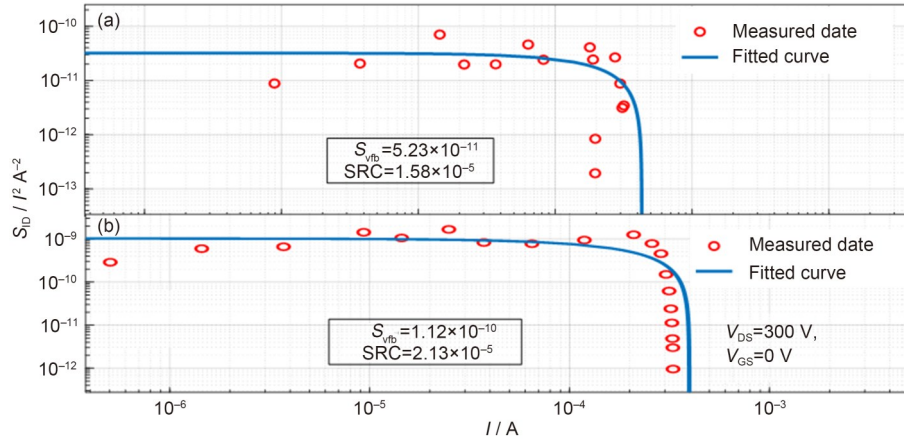


图9 Type B 器件在 10 MeV 质子加偏辐照前后器件的 1/f 噪声特性:(a)未辐照器件;(b)质子辐照后的器件
Fig.9 1/f noise characteristics of Type B devices before and after 10 MeV proton irradiation under biased conditions: (a) unirradiated device; (b) proton-irradiated device

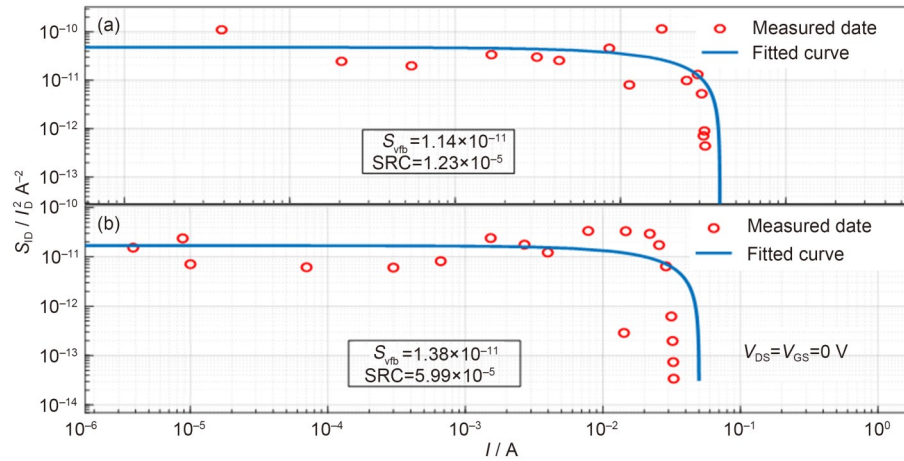


图10 Type B 器件在 10 MeV 质子零偏辐照前后器件的 1/f 噪声特性:(a)未辐照器件;(b)质子辐照后的器件
Fig. 10 1/f noise characteristics of Type B devices before and after 10 MeV proton irradiation under zero-bias conditions: (a) unirradiated device; (b) proton-irradiated device

3 结论

本文研究了质子辐照对 GaN HEMT 器件的辐照损伤, 试验中采用了两种型号的器件、10 MeV 和 60 MeV 两个能量的质子、零偏和加偏两种偏置条件。通过研究发现器件在低能量下的损伤更严重, 在 10 MeV 质子能量下器件的饱和漏电流、阈值电压、跨导和其他静态参数的退化程度明显大于 60 MeV 质子能量下辐照的器件。分析认为这与质子的沉积能量的位置有关, 10 MeV 质子沉积能量的位置更靠近沟道, 所以产生的缺陷更多, 造成器件的退化更大。研究发现加偏置辐照条件下的器件损伤大于零偏置辐照条件, 分析认为加偏辐照产生的电场放大了辐照损伤。对比不同器件在质子辐照下的损伤程度, 发现其差异主要与器件的导通电阻有关, 导通电阻较低的器件在质子辐照后产生了更多的界面缺陷, 使得器件的电学参数出现更严重的退化。通过 1/f 低频噪声进行缺陷表征, 发现质子辐照后器件界面缺陷密度增大, 缺陷变化量与器件参数退化量一致。

作者贡献声明 谢永智负责辐照试验、数据处理、论文撰写; 崔江维负责试验设计、数据分析、指导论文撰写及修改; 李小龙参与试验设计、数据分析; 刘默寒参与试验方案制定; 郑齐文参与论文修改; 梁晓雯参与辐照试验; 史成城负责辐照试验实施; 王金鹏参与辐照试验实施; 郭旗参与指导论文; 李豫东参与指导论文。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 谷文萍, 张进成, 张林, 等. GaN 基材料和器件的质子辐照效应[J]. 半导体技术, 2016, **41**(7): 514-519. DOI: 10.13290/j.cnki.bdtjs.2016.07.007.
GU Wenping, ZHANG Jincheng, ZHANG Lin, *et al.* Proton radiation effects of GaN-based materials and devices[J]. Semiconductor Technology, 2016, **41**(7): 514-519. DOI: 10.13290/j.cnki.bdtjs.2016.07.007.
- 房鑫. AlGaIn/GaN HEMT 器件低能质子辐射可靠性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
FANG Xin. Study on low energy proton irradiation reliability of AlGaIn/GaN HEMTs[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- 刘峻. AlGaIn/GaN HEMT 开关特性的空间质子辐照效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
LIU Jun. Study on space proton irradiation effect of AlGaIn/GaN HEMT switching characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023.
- 季启政, 刘峻, 杨铭, 等. AlGaIn/GaN HEMT 质子辐射效应研究进展[J]. 航天器环境工程, 2022, **39**(4): 436-445. DOI: 10.12126/sec.2022.04.016.
JI Qizheng, LIU Jun, YANG Ming, *et al.* Review of proton irradiation effect to AlGaIn/GaN HEMT[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, **39**(4): 436-445. DOI: 10.12126/sec.2022.04.016.
- 岳少忠. AlGaIn/GaN HEMT 器件的辐射损伤实验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
YUE Shaozhong. Study on the irradiation induced damage of AlGaIn/GaN HEMT devices[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- 谷文萍, 张林, 杨鑫, 等. 质子辐照对场板 AlGaIn/GaN HEMT 器件电特性的影响[J]. 电子学报, 2016, **44**(6): 1445-1449. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.06.027.
GU Wenping, ZHANG Lin, YANG Xin, *et al.* The effect of proton irradiation on electrical properties of FP-AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, **44**(6): 1445-1449. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.06.027.
- 吕玲. GaN 基半导体材料与 HEMT 器件辐照效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
LYU Ling. Study of radiation effects of GaN-based semiconductor materials and HEMTs[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- 吕玲, 林志宇, 张进成, 等. GaN 基高电子迁移率晶体管的质子辐照效应研究[J]. 空间电子技术, 2013, **10**(3): 33-38. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7135.2013.03.008.
LYU Ling, LIN Zhiyu, ZHANG Jincheng, *et al.* Proton irradiation effect of GaN-based high electron mobility transistor[J]. Space Electronic Technology, 2013, **10**(3): 33-38. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7135.2013.03.008.
- 吕玲, 张进成, 李亮, 等. 3 MeV 质子辐照对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管的影响[J]. 物理学报, 2012, **61**(5): 390-397.
LYU Ling, ZHANG Jincheng, LI Liang, *et al.* Effect of 3 MeV proton irradiations on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Acta Physica Sinica, 2012, **61**(5): 390-397.
- KIM H, LEE J H, PARK S H, *et al.* The effect of high-energy proton irradiation on the electrical characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Journal of Applied Physics,

- 2020, **120**(11): 113301.
- 11 Zhang X, Liu Y, Wang L, *et al.* High-energy proton irradiation induced degradation in AlGaIn/GaN HEMTs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, **68**(7): 1938-1945.
 - 12 Yang Y, Ji Q, Liu J, *et al.* Energy dependence of proton-induced degradation in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020, **67**(2): 338-344.
 - 13 朱甜, 郑雪峰, 尹太续, 等. 质子辐照对 AlGaIn/GaN MIS-HEMTs 器件电学性能和陷阱演化的影响研究[J]. 微纳电子与智能制造, 2024, **6**(3): 7-15. DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2024.03.007.
 - ZHU Tian, ZHENG Xuefeng, YIN Taixu, *et al.* Study on effect of proton irradiation on electrical performance and trap evolution of AlGaIn/GaN MIS-HEMTs[J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2024, **6**(3): 7-15. DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2024.03.007.
 - 14 刘峻, 季启政, 杨铭, 等. 质子辐照对 AlGaIn/GaN HEMT 亚阈值摆幅特性的影响[J]. 半导体技术, 2023, **48**(2): 110-116. DOI: 10.13290/j.cnki.bdtjs.2023.02.003.
 - LIU Jun, JI Qizheng, YANG Ming, *et al.* Influence of proton irradiation on subthreshold swing characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Semiconductor Technology, 2023, **48**(2): 110-116. DOI: 10.13290/j.cnki.bdtjs.2023.02.003.
 - 15 白如雪, 郭红霞, 张鸿, 等. 增强型 Cascode 结构氮化镓功率器件的高能质子辐射效应研究[J]. 物理学报, 2023, **72**(1): 44-50. DOI: 10.7498/aps.72.20221617.
 - BAI Ruxue, GUO Hongxia, ZHANG Hong, *et al.* High-energy proton radiation effect of Gallium nitride power device with enhanced Cascode structure[J]. Acta Physica Sinica, 2023, **72**(1): 44-50. DOI: 10.7498/aps.72.20221617.
 - 16 Yang J, Wang R X, Liu Y B, *et al.* Bias-enhanced degradation under proton irradiation in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, **66**(8): 3221-3228.
 - 17 Kang H S, Lee J G, Choi W S, *et al.* Effect of biasing on proton irradiation degradation in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, **65**(7): 1385-1392.
 - 18 Zhang Y, Zhou X F, Chen L, *et al.* Low-field and high-field effects of proton irradiation on AlGaIn/GaN HEMTs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2022, **69**(3): 1675-1680.
 - 19 Liu M, Zhang H, Yu S, *et al.* Low bias and high bias effects on AlGaIn/GaN HEMTs under proton irradiation [J]. Microelectronics Reliability, 2020, **115**: 113-120.
 - 20 Wang P, Jiang R, Chen J, *et al.* 1/f noise in As-processed and proton-irradiated AlGaIn/GaN HEMTs due to carrier number fluctuations[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017, **64**(1): 181-189. DOI: 10.1109/TNS.2016.2636123.
 - 21 Nakano M L, Tanaka S, Suzuki T, *et al.* Defect generation and evolution in GaN under proton irradiation [J]. Journal of Applied Physics, 2021, **125**(14): 144301.
 - 22 Liu S, Wang Y, Gao X, *et al.* Effects of the proton-induced vacancies and defects in GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, **66**(4): 1772-1779.
 - 23 Kolahdouz K M, Mirzaei M, Rezaei A, *et al.* Radiation-induced deep traps in AlGaIn/GaN HEMTs and their impact on device performance[J]. IEEE Transactions on User Electron Devices, 2021, **68**(3): 1034-1040.
 - 24 Puzyrev H, Ivanov S, Korolev A, *et al.* Defects and traps in GaN HEMTs under proton irradiation[J]. Applied Physics Letters, 2021, **118**(2): 023506.
 - 25 艾月. p-GaN HEMT 器件可靠性退化机理研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2024.
 - AI Yue. Study on reliability degradation mechanism of p-GaN HEMT devices[D]. Xi'an: Xidian University, 2024.
 - 26 杜敏. P 栅常关型 GaN HEMT 器件质子辐照效应仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
 - DU Min. Simulation study on proton irradiation effects of p-gate normally-off GaN HEMT devices[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.
 - 27 王玉才. 共源共栅 GaN HEMT 器件高能质子辐照损伤研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024.
 - WANG Yucai. Study on high-energy proton irradiation damage of cascode GaN HEMT devices[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.
 - 28 陈管君. 质子辐照对 AlGaIn/GaN 异质结构的影响研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
 - CHEN GuanJun. Study on the effect of proton irradiation on AlGaIn/GaN heterostructures[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.