

# 重离子辐射对 AlGaN/GaN 高电子迁移率 晶体管低频噪声特性的影响\*

吕玲<sup>1)</sup> 邢木涵<sup>1)</sup> 薛博瑞<sup>1)</sup> 曹艳荣<sup>2)†</sup> 胡培培<sup>3)</sup>  
郑雪峰<sup>1)</sup> 马晓华<sup>1)</sup> 郝跃<sup>1)</sup>

1) (西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2022 年 7 月 8 日收到; 2023 年 10 月 30 日收到修改稿)

采用  $^{181}\text{Ta}^{32+}$  重离子辐射 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管, 获得器件在重离子辐射前后的电学特性和低频噪声特性. 重离子辐射导致器件的阈值电压正向漂移、最大饱和电流减小等电学参数的退化. 微光显微测试发现辐射后器件热点数量明显增加, 引入更多缺陷. 随着辐射注量的增加, 电流噪声功率谱密度逐渐增大, 在注量为  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 重离子辐射后, 缺陷密度增大到  $3.19 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>·eV<sup>-1</sup>, 不同栅压下的 Hooge 参数增大. 通过漏极电流噪声归一化功率谱密度随偏置电压的变化分析, 发现重离子辐射产生的缺陷会导致寄生串联电阻增大.

**关键词:** 重离子辐射, 氮化镓, 高电子迁移率晶体管, 低频噪声

**PACS:** 61.80.-x, 71.55.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.73.20221360

## 1 引言

宽禁带氮化镓 (GaN) 具有电子饱和速度高、临界击穿电场高、热导率高和直接带隙等优点, 是制备微波射频和电力电子器件的理想半导体材料. AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 由于其优异的电学性能和超强的抗辐射特性, 在卫星通信、雷达和核反应堆等关键领域具有重要的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 在辐射环境中, 辐射粒子会与半导体器件相互作用, 产生许多新的失效机制, 如栅退化、陷阱俘获和释放、热载流子产生导致开启电阻增大、器件击穿、阈值电压漂移、栅泄漏电流增大等, 直接导致器件性能

退化甚至失效<sup>[4-6]</sup>. 在空间辐射环境中, 范艾伦辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线都存在重离子. 因此, 本文重点关注 AlGaN/GaN HEMT 器件的高能重离子辐射效应.

重离子入射 AlGaN/GaN HEMT 器件, 主要引起总剂量效应、单粒子效应和位移损伤效应. 美国 Vanderbilt 大学 Fleetwood 小组和 Florida 大学 Pearton 小组长期致力于 AlGaN/GaN HEMT 器件辐射效应研究, 大量试验结果表明, AlGaN/GaN HEMT 器件具有极强的抗总剂量效应<sup>[7,8]</sup>. 自 2007 年以来, 研究者针对 AlGaN/GaN HEMT 器件重离子辐射导致的单粒子效应展开了研究, 发现了单粒子烧毁 (single event burnout, SEB) 和单粒子栅穿 (single event gate rupture, SEGR) 现

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 12035019, 62234013) 资助的课题.

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

象<sup>[9,10]</sup>. 此效应对功率器件更为明显<sup>[11]</sup>, 而射频器件几乎观察不到<sup>[12]</sup>. 因此, 针对 AlGaIn/GaN HEMT 射频器件, 重点关注其重离子辐射引起的位移损伤效应<sup>[13]</sup>. 重离子穿过器件时, 会在器件不同位置产生间隙、空位、络合物等缺陷, 缺陷或者缺陷簇聚集甚至形成潜在离子径迹, 从而造成器件性能的退化. Lei 等<sup>[14]</sup> 利用 800 MeV 的 Bi 离子辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 辐射后器件的漏极电流和最大跨导分别下降 6.8% 和 3.2%, 栅漏电流增大了 5 倍以上, 栅延迟也急剧增加, 并认为重离子辐射产生的缺陷会导致二维电子气浓度降低. Sasaki 等<sup>[15]</sup> 采用 18 MeV Ni 重离子辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件后发现有位错环产生, 但没有发现条形的径迹. Hu 等<sup>[16]</sup> 采用快重离子以不同的注量辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 器件电学特性退化显著, 阈值电压正漂了 85%, 最大饱和电流降低了约两个数量级. 通过透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM), 首次在 <sup>209</sup>Bi 重离子辐射后的 GaN 中观察到连续的粒子径迹. Challa 等<sup>[17]</sup> 用 75 MeV 硫离子辐射 HEMT 器件, 发现在较高的注量下可以诱发较大的阈值电压漂移. 分析认为, 重离子辐射在缓冲层中形成受主缺陷是 GaN 基 HEMT 器件退化的主要机制.

纵观国内外关于 AlGaIn/GaN HEMT 器件重离子辐射位移效应研究进展, 均是仅获得了器件电学特性退化规律, 并未对辐射缺陷进行详细表征分析. 因此, 本文采用了微光显微镜 (EMMI) 和低频噪声法, 对重离子辐射前后器件中缺陷从直观上进行甄别和定位. EMMI 由电激励而引起的光激发, 可以应用于探测非常微弱的光. 在失效分析中, 器件会因为存在漏电和热载流子效应而发光<sup>[18]</sup>. 半导体器件噪声的大小可以敏感地反映器件内在质量和可靠性的优劣. 通过低频噪声测试可以表征半导体器件中包含的陷阱信息, 可以充分地反映器件的可靠性问题<sup>[19,20]</sup>.

## 2 实验

本次实验所采用的 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构示意图如图 1 所示. AlGaIn/GaN HEMT 器件是在西安电子科技大学宽带隙半导体技术国家重点学科实验室工艺平台上制备完成. 采用金属-有机化学气相沉积 (metal-organic chemical vapor

deposition, MOCVD) 在蓝宝石上依次生长 AlN 成核层, 2  $\mu\text{m}$  的无掺杂氮化镓缓冲层, 22 nm 厚的 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N 势垒层. 源、漏极为欧姆接触, 金属为 Ti/Al/Ni/Au (20 nm /160 nm/55 nm/45 nm), 栅极为肖特基接触, 金属为 Ni/Au/Ni(45 nm/100 nm/20 nm). 在器件表面制备了厚度为 180 nm 的氮化硅钝化层, 栅长和栅宽分别为 0.2  $\mu\text{m}$  和 50  $\mu\text{m}$ .

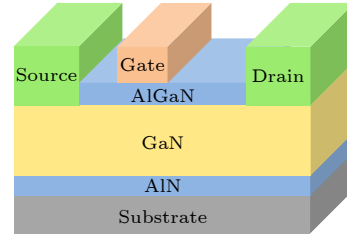


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构示意图  
Fig. 1. Schematic cross-section of AlGaIn/GaN HEMT.

辐射实验是在兰州重离子加速器装置完成的, 室温下用 2.1 GeV 能量的 <sup>181</sup>Ta<sup>32+</sup> 辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 辐射注量分别为  $1 \times 10^8$ ,  $1 \times 10^9$ ,  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>. 每一个注量点实验样品 8 只以上, 确保电学参数测试时获得统计数据, 提高实验可信度. 辐射实验完毕, 器件放置 2 h 以上, 利用 Keithly 4200 半导体参数分析仪对器件输出、转移等特性进行初测, 从而提取器件阈值电压、最大饱和漏极电流随重离子辐射注量的变化规律. 再对辐射样品进行 EMMI 测试和低频噪声测试, 实现对重离子辐射缺陷的定位和表征.

## 3 实验结果分析

### 3.1 AlGaIn/GaN HEMT 器件电学特性变化

图 2 显示了重离子辐射前后器件阈值电压变化. 随着辐射注量的增加, 阈值电压逐渐正漂, 重离子辐射后, 器件电学参数显著退化. 当辐射注量为  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 时, 阈值电压  $V_{th}$  正向漂移了约 25%.

AlGaIn/GaN HEMT 器件  $V_{th}$  主要和 Al 组分、掺杂浓度、势垒层厚度有关, 如考虑极化效应、界面态、缓冲层陷阱等, 可以表示成如下公式<sup>[21]</sup>:

$$V_{th} = \frac{\phi_b}{q} - \frac{d\sigma}{\varepsilon} - \frac{\Delta E_c}{q} + \frac{E_{f0}}{q} - \frac{q}{\varepsilon} \int_0^d dx \times \int_0^x N_{\text{barrier}}(x) dx - \frac{q d N_{st}}{\varepsilon} - \frac{q N_{\text{buffer}}}{C_b}, \quad (1)$$

其中,  $\phi_b$  是肖特基势垒高度,  $\sigma$  是 AlGaIn/GaN 界面极化电荷密度,  $d$  是 AlGaIn 势垒层厚度,  $\epsilon$  是 AlGaIn 层介电常数,  $\Delta E_c$  是 AlGaIn/GaN 界面导带带阶,  $E_{F0}$  是 GaN 侧量子阱底部导带能量与费米能级的距离,  $N_{\text{barrier}}(x)$  是 AlGaIn 势垒层有效电离杂质浓度,  $N_{\text{st}}$  是表面态密度,  $N_{\text{buffer}}$  是缓冲层缺陷浓度,  $C_b$  是缓冲层-沟道电容,  $q$  是单位电子电荷.

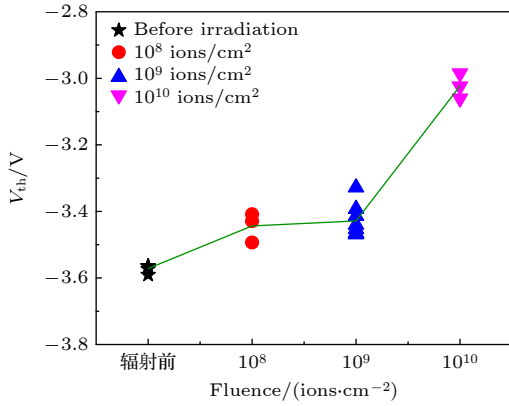


图 2 重离子辐射前后器件阈值电压变化

Fig. 2. Change of threshold voltage before and after heavy ion radiation.

重离子辐射导致的位移损伤在异质结各层中引入深能级陷阱和电子陷阱, 通过载流子去除效应和增加陷阱辅助隧穿, 改变  $N_{\text{barrier}}(x)$ ,  $N_{\text{buffer}}$ ,  $N_{\text{st}}$  和  $\phi_b$ , 最终造成  $V_{\text{th}}$  的漂移、漏电流、跨导和栅泄漏电流的退化. 如果在栅极下方的 AlGaIn 势垒层中引入大量的负电荷, 耗尽沟道中的二维电子气 (2DEG), 能带提升, 使得  $V_{\text{th}}$  正向漂移. 因此, 可认为重离子辐射的位移损伤导致在 AlGaIn 势垒层和 GaN 缓冲层中引入了负电性的类受主缺陷, 该类陷阱减小了沟道中的 2DEG 浓度, 从而导致辐射后器件  $V_{\text{th}}$  正向漂移.

重离子辐射前后不同栅压下的最大饱和电流如图 3 所示. 可以看到随着辐射注量的增加, 在不同栅压下饱和电流出现下降趋势. 当栅压为 2 V 条件下, 辐射注量为  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 时, 器件的最大饱和电流为 672 mA/mm, 而辐射前的最大饱和电流值为 782 mA/mm.

漏极最大饱和电流可以表示为

$$I_{\text{dsat}} = \frac{W_G v_{\text{sat}} \epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}}}{d_{\text{AlGaIn}}} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}), \quad (2)$$

其中,  $W_G$  是栅宽,  $v_{\text{sat}}$  是载流子饱和速度,  $\epsilon_0 \epsilon_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 势垒层介电常数,  $\epsilon_0$  是真空介电常数,  $d_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 势垒层厚度,  $V_{\text{gs}}$  是栅电压.

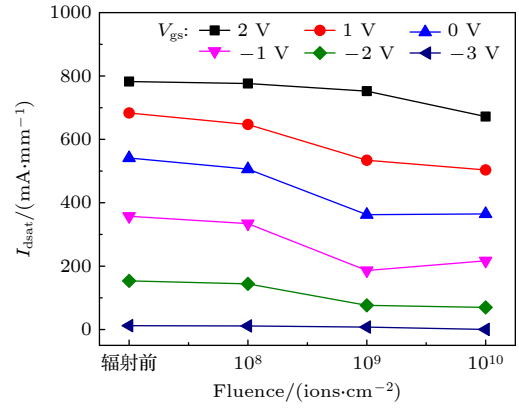


图 3 重离子辐射前后不同栅压下的最大饱和电流

Fig. 3. Maximum saturation current under different gate voltages before and after heavy ion radiation.

最大饱和电流的降低是由于 2DEG 浓度和饱和载流子速度降低引起的. 重离子辐射产生的位移效应引入了大量的缺陷. 缺陷通过库仑散射降低了载流子迁移率, 通过载流子复合和去除降低了 2DEG 浓度. 在注入电流较大或载流子浓度较高时, 载流子间的散射会更为严重, 进而造成载流子迁移率的减小. 因此随着辐射注量的增加, 位移损伤越严重, 产生的缺陷越多, 导致饱和电流出现下降的趋势.

### 3.2 AlGaIn/GaN HEMT 器件微观显微变化

对重离子辐射前后的器件进行 EMMI 测试, 分析重离子辐射所导致的缺陷位置. 图 4 显示重离子辐射前后在栅电压  $V_{\text{gs}} = -7$  V 和漏源电压  $V_{\text{ds}} = 30$  V 时的 EMMI 测试结果图, 其中 (a) 辐射前, (b)  $1 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>, (c)  $1 \times 10^9$  ions/cm<sup>2</sup>, (d)  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>. 可以看到辐射前和辐射后都出现不同数量的“热点”, 通过“热点”可以定位器件辐射缺陷的密度. HEMTs 器件的栅极为肖特基接触, 栅极电子在表面态和势垒层缺陷的辅助作用下, 很容易跨越肖特基势垒进入异质结的 2DEG 沟道, 发生严重的栅关态漏电, 导致器件亚阈值特性恶化. 因此“热点”越多, 引入的辐射缺陷就越多, 说明器件辐射损伤就越严重, 泄漏电流也就越大. 在注量为  $1 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup> 和  $1 \times 10^9$  ions/cm<sup>2</sup> 重离子辐射后, “热点”数量基本没有发生变化, 说明对器件的辐射损伤较小; 在注量为  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 重离子辐射后, “热点”数量明显增加, 说明辐射后漏电增大, 辐射导致缺陷密度增大, 对器件损伤较为严重.

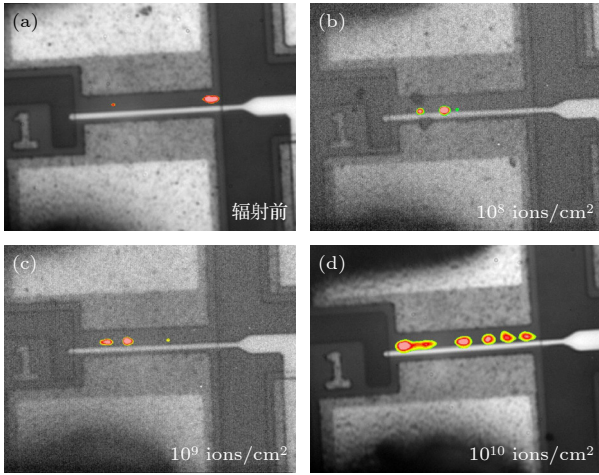


图 4 重离子辐射前后 EMMI 测试结果图 (a) 辐射前; (b)  $1 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>; (c)  $1 \times 10^9$  ions/cm<sup>2</sup>; (d)  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>  
Fig. 4. EMMI test results before and after heavy ion radiation: (a) Before radiation; (b)  $1 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>; (c)  $1 \times 10^9$  ions/cm<sup>2</sup>; (d)  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>.

### 3.3 AlGaIn/GaN HEMT 器件噪声特性变化

通过 FS-Pro 系列半导体参数测试系统对重离子辐射前后的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的  $1/f$  噪声进行测试, 表征重离子辐射在器件中引入的缺陷. 在噪声测试中, 给漏极施加 0.15 V 电压, 栅压从阈值电压附近逐渐增大. 图 5 为原始器件在不同栅压下的归一化功率谱密度  $S_{ID}/I_D^2$  测试结果. 这里  $S_{ID}$  是沟道电流涨落的噪声功率谱密度,  $I_D$  是沟道电流. 从图 5 可以发现随着栅压的增大, 噪声逐渐减小, 通过数据拟合可得到频率指数因子  $\gamma$  的数值为 0.98 非常接近 1, 是属于  $1/f$  噪声的特征.

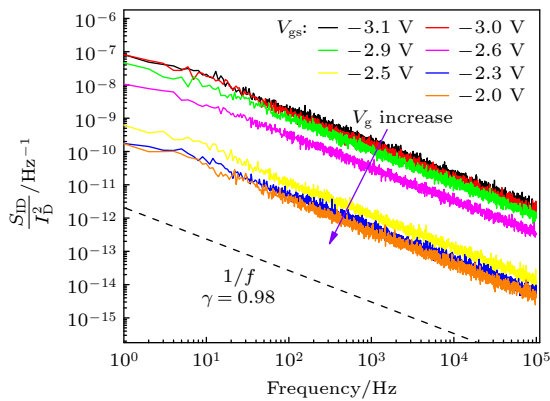


图 5 辐射前器件在不同栅压下的噪声测试结果  
Fig. 5. Noise test results of the devices under different gate voltages before irradiation.

图 6 显示了在重离子辐射前后 AlGaIn/GaN HEMT 器件在  $V_{gs} - V_{th} = 1$  V 时漏极电流噪声

归一化功率谱密度  $S_{ID}/I_D^2$  与辐射注量的关系. 可以看出在 1 V 的过驱动电压下, 随着辐射注量的增加, 噪声功率谱密度逐渐增大. 表明重离子辐射后缺陷密度增大.

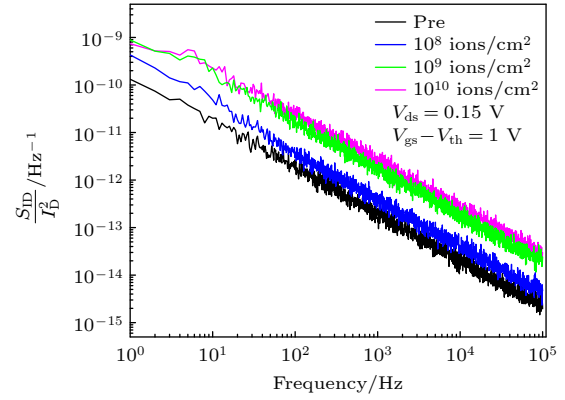


图 6 重离子辐射前后漏极电流噪声归一化功率谱密度与频率的关系  
Fig. 6. Relationship between frequency and normalized power spectral density of drain current noise before and after heavy ion radiation.

为了更好地分析辐射对器件缺陷密度的影响, 在 10 Hz 下对噪声功率谱密度进行归一化, 其与漏极电流之间的关系如图 7 所示. 可以发现, 图 7 所示曲线和  $S_{vbf} (g_m/I_D)^2 I_D$  曲线具有很好的相关性, 表明可以用载流子涨落模型来分析沟道界面附近缺陷对载流子的俘获和释放所产生的  $1/f$  噪声<sup>[22,23]</sup>. 这里,  $S_{vbf}$  是功率谱密度,  $g_m$  是跨导,  $I_D$  是漏极电流. 载流子涨落模型认为半导体导带或价带的载流子通过隧道贯穿与表面氧化层中的陷阱相互作用, 是引起  $1/f$  噪声的主要原因<sup>[24]</sup>. 通过数据拟合使  $S_{vbf} (g_m/I_D)^2 I_D$  曲线与测量得到的归一化功率谱密度数据有良好的匹配, 从直流的数据提取  $g_m/I_D$ . 基于载流子涨落模型,  $S_{ID}/I_D^2$  公式表示如下<sup>[25]</sup>:

$$\frac{S_{ID}}{I_D^2} = \left( \frac{g_m}{I_D} \right)^2 S_{vbf}. \quad (3)$$

从图 7 可以看到: 辐射前  $S_{vbf}$  的数值为  $7.09 \times 10^{-11}$  V<sup>2</sup>/Hz; 辐射后注量为  $1 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>,  $1 \times 10^9$  ions/cm<sup>2</sup>,  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 时  $S_{vbf}$  的数值分别为  $9.75 \times 10^{-11}$  V<sup>2</sup>/Hz,  $1.17 \times 10^{-10}$  V<sup>2</sup>/Hz,  $1.75 \times 10^{-10}$  V<sup>2</sup>/Hz. 由此可以看出, 随着重离子辐射注量的增大,  $S_{vbf}$  的数值逐渐增大. 而  $S_{vbf}$  的数值又与器件的缺陷密度有关:

$$S_{vbf} = \frac{q^2 k T \lambda N_{it}}{W L f C_{AlGaIn}^2}, \quad (4)$$

其中,  $\lambda$  是 AlGaIn/GaN 层隧穿衰减距离<sup>[26]</sup>,  $\lambda = 0.5$  nm;  $W$  和  $L$  分别表示栅宽和栅长;  $C_{\text{AlGaIn}}$  是 AlGaIn 层势垒电容. 由 (4) 式可以得到缺陷的密度  $N_{\text{it}}$ .

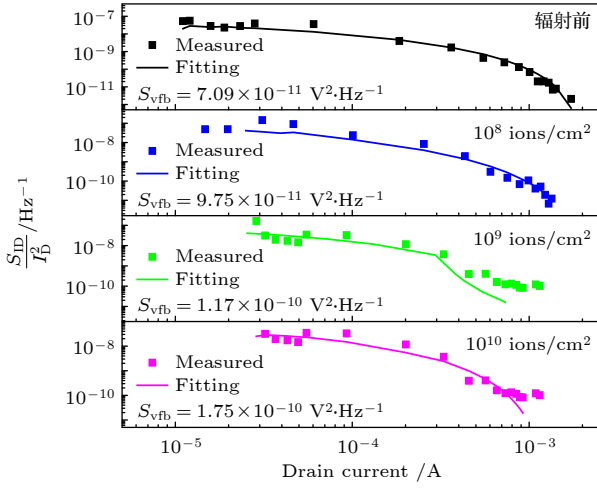


图 7 重离子辐射前后归一化漏极电流噪声与漏极电流的函数关系

Fig. 7. Normalized drain current noise as a function of drain current before and after heavy ion irradiation.

通过 (4) 式求得器件辐射前的缺陷密度是  $1.29 \times 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 辐射后注量为  $1 \times 10^8 \text{ ions/cm}^2$ ,  $1 \times 10^9 \text{ ions/cm}^2$ ,  $1 \times 10^{10} \text{ ions/cm}^2$  时缺陷密度分别为  $1.77 \times 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $2.12 \times 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $3.19 \times 10^{18} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ . 从  $N_{\text{it}}$  的结果可以发现, 随着重离子辐射注量的增加, 缺陷密度逐渐加大, 对器件造成更加严重的影响. 这可能是由辐射诱导的界面态、边界陷阱和陷阱电荷相互作用引起的.

迁移率涨落模型是 Hooge 从经验公式出发提出的, 该模型认为  $1/f$  噪声是一种效应, 因而对于不同结构的器件参数 (即所谓的 Hooge 参数) 应具有相同的值<sup>[27]</sup>. 目前, 基于迁移率涨落机制的 Hooge 参数能反映半导体的本征缺陷, Hooge 参数  $\alpha_{\text{CH}}$  越大, 所对应的半导体器件缺陷越多.

归一化漏极电流噪声的 Hooge 方程为

$$\frac{S_{\text{ID}}}{I_{\text{D}}^2} \cong \frac{\alpha_{\text{CH}}}{A_{\text{CH}} N_{\text{CH}} f}, \quad (5)$$

其中,  $A_{\text{CH}}$  为器件沟道面积,  $N_{\text{CH}}$  为沟道中载流子浓度. 在器件的线性工作区且漏极电压比较低的时候, 沟道中的载流子浓度与栅极所加的偏压成正比, 公式为

$$N_{\text{CH}} = \frac{1}{q} C_{\text{AlGaIn}} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}). \quad (6)$$

通过 (5) 式和 (6) 式对辐射前和辐射注量为  $1 \times 10^{10} \text{ ions/cm}^2$  的噪声曲线进行拟合得到不同的过驱动电压下的 Hooge 参数. 从图 8 可以发现, 辐射后的 Hooge 参数明显高于辐射前, 说明辐射引入了大量缺陷. AlGaIn/GaN HEMT 器件栅极下方的空间电荷区陷阱能产生  $1/f$  噪声. Achouche 等<sup>[28]</sup> 认为陷阱的俘获和释放引起沟道电导的  $1/f$  噪声调制, 从而导致漏极电流的  $1/f$  波动. 因此, 可认为辐射导致 AlGaIn/GaN HEMT 器件缺陷密度增大, 寄生串联电阻增大, 导致 Hooge 参数  $\alpha_{\text{CH}}$  变大.

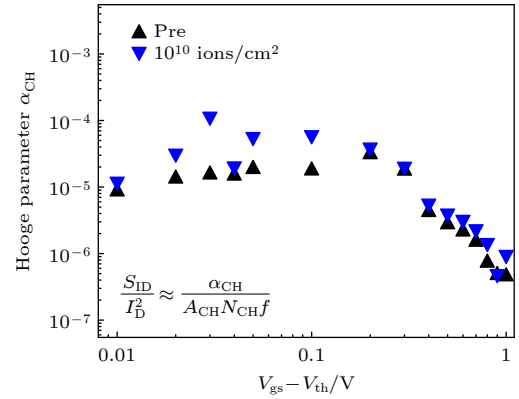


图 8 辐射前后 Hooge 参数和过驱动电压的关系

Fig. 8. Relationship between Hooge parameters and overdrive voltage before and after heavy ion irradiation.

为了更准确定位  $1/f$  噪声源, 对辐射前后的噪声数据进行处理. 如图 9 所示, 展示了辐射前后归一化漏极电流噪声  $S_{\text{ID}}/I_{\text{D}}^2$  和过驱动电压 ( $V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}$ ) 的关系. 从图 9(a) 能观察到两个斜率为

$$\frac{\log(S_{\text{ID}}/I_{\text{D}}^2)}{\log(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})} = -1, -3. \quad (7)$$

从图 9(b) 能观察到 3 个斜率为

$$\frac{\log(S_{\text{ID}}/I_{\text{D}}^2)}{\log(V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})} = -1, -3, 0. \quad (8)$$

我们认为产生  $1/f$  噪声主要是由栅下沟道电阻  $R_{\text{g}}$  和非栅极区域的固有电阻  $R_{\text{u}}$  产生, 其中  $R_{\text{g}}$  随  $V_{\text{gs}}$  的变化而变化,  $R_{\text{u}}$  为定值. 噪声由哪部分电阻主导, 可以由斜率得到. 产生的总噪声为

$$S_{\text{R}} = S_{R_{\text{g}}} + S_{R_{\text{u}}}. \quad (9)$$

由 2DEG 引起的  $1/f$  噪声其经验关系式为

$$\frac{S_{\text{I}}}{I^2} = \frac{S_{\text{V}}}{V^2} = \frac{S_{\text{R}}}{R^2} = \frac{\alpha}{fN}, \quad (10)$$

其中,  $N$  为沟道载流子数目,  $\alpha$  是单位沟道面积的 Hooge 参数. 与栅压有关的两部分噪声可以写成:

$$S_{R_g} = \frac{\alpha R_g^2}{f N_g} \propto V_{gs}^{-3}, \quad (11)$$

$$S_{R_u} = \frac{\alpha R_u^2}{f N_u} \propto V_{gs}^0, \quad (12)$$

其中,  $N_g$  是栅下沟道的载流子数,  $N_u$  为非栅极区域的沟道的载流子数.

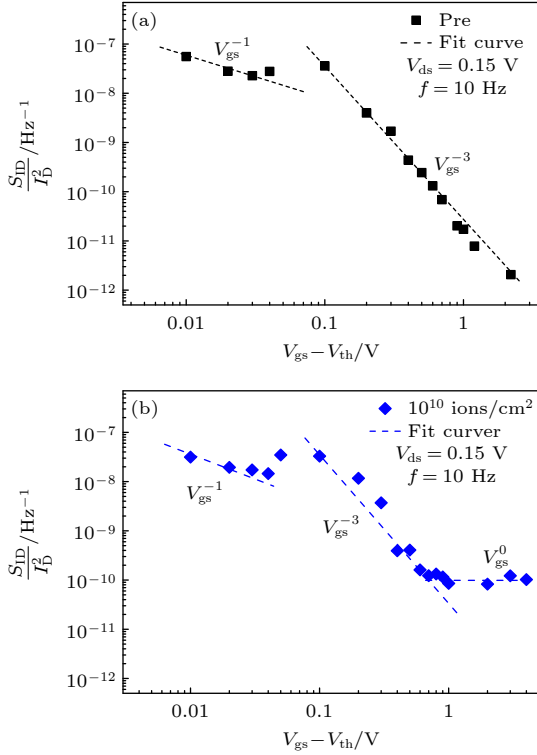


图 9 归一化漏极电流噪声与过驱动栅压的函数关系 (a) 辐射前; (b) 辐射后

Fig. 9. Function relationship between normalized drain current noise and overactuated gate voltage: (a) Before radiation; (b) after radiation.

从图 9(b) 可以观察到有 3 个不同的斜率, 主要有 3 种情况.

1) 当栅极电压比较低时, 主要在阈值电压  $V_{th}$  附近时, 器件沟道中只有很少量的电子, 在这种情况下, 栅下沟道区域的电阻  $R_g$  大于非栅极区域电阻  $R_u$ ,  $1/f$  噪声主要是由栅下沟道区域贡献. 此时,  $1/f$  噪声为

$$\frac{S_{ID}}{I^2} = \frac{S_V}{V^2} = \frac{S_R}{R^2} = \frac{\alpha}{fN} \propto V_{gs}^{-1}. \quad (13)$$

2) 当栅极电压继续增大时, 沟道中逐渐出现大量的电子, 栅下沟道区域的电阻  $R_g$  逐渐降低,

并且低于非栅极区域电阻  $R_u$ . 此时,  $1/f$  噪声为

$$\frac{S_{ID}}{I^2} = \frac{S_V}{V^2} = \frac{S_R}{R^2} = \frac{\alpha}{fN} \propto V_{gs}^{-3}. \quad (14)$$

3) 当栅极电压比较大的时候, 此时的电阻和  $1/f$  噪声主要是由非栅极区域决定, 与栅极电压无关. 此时,  $1/f$  噪声为

$$\frac{S_{ID}}{I^2} = \frac{S_V}{V^2} = \frac{S_R}{R^2} = \frac{\alpha}{fN} \propto V_{gs}^0. \quad (15)$$

从图 9 可以发现, 在过驱动电压大于 0.01 V, 小于 0.1 V 时, 斜率为 -1, 表明此时  $1/f$  噪声主要是由栅下沟道区域产生, 随着过驱动电压的逐渐增大, 斜率变为 -3, 说明此时  $1/f$  噪声主要是由非栅极区域产生. 随着栅压逐渐增大, 栅下沟道电阻逐渐减小, 并且小于非栅极区域的电阻. 对比图 9(a), (b) 可以发现, 在重离子辐射注量为  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 的测试结果中, 当过驱动电压大于 1 V 时, 斜率变为 0, 说明此时  $1/f$  噪声主要是由非栅极区域的电阻决定, 而在辐射前的器件中并没有出现. 我们认为重离子辐射引入的缺陷会导致 AlGaIn/GaN HEMT 器件的寄生串联电阻变大, 从而增加  $1/f$  噪声. 辐射缺陷会导致 AlGaIn 表面形成较高的表面态密度, 增加 AlGaIn/GaN 界面陷阱态, 使得 HEMT 器件栅极泄漏电流偏大, 特别是在射频信号的驱动下, 器件的栅极一旦处于开启状态下, 就会导致栅极电流呈指数增大, 从而造成肖特基接触退化. 当 HEMT 器件在射频信号下连续工作时, 这种高的栅极漏电就会严重影响器件长期工作的可靠性, 导致栅极泄漏电流增大, 降低 AlGaIn/GaN HEMT 器件的击穿电压和功率附加效率, 增大噪声系数.

## 4 结 论

本文研究了重离子辐射对 AlGaIn/GaN HEMT 器件造成的位移损伤效应. 随着重离子辐射注量的增加, 位移损伤引入的缺陷越多. 这些缺陷通过载流子俘获和去除效应减小 2DEG 浓度, 缺陷还会成为附加散射中心从而使迁移率减小, 导致器件电学特性逐渐退化. 在  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 注量的重离子辐射后, 器件电学特性退化严重, 阈值电压正向漂移 25%, 漏极饱和电流退化明显. 对重离子辐照前后的器件进行 EMMI 测试分析辐照引入的缺陷位置, 发现注量为  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup> 重离子辐射后,

“热点”数量明显增多,说明辐射导致缺陷密度增大,对器件损伤较为严重.对重离子辐射前后的AlGaIn/GaN HEMT器件进行低频噪声测试,发现辐射后器件的电流噪声功率谱密度由于辐射缺陷的引入而变大.通过噪声数据拟合,发现辐射后的缺陷密度随着注量的增加而逐渐变大.在辐射注量为 $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>时,缺陷密度达到 $3.19 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>·eV<sup>-1</sup>.对漏极电流噪声归一化功率谱密度与偏置电压进行拟合,发现重离子辐射所引入的缺陷会使寄生串联电阻变大.

## 参考文献

- [1] Baliga B J 2013 *Semicond. Sci. Technol.* **28** 074011
- [2] Amano H, Baines Y, Beam E, et al. 2018 *J. Phys. D Appl. Phys.* **51** 163001
- [3] Nedelcescu A I, Carlone C, Houdayer A, Bardeleben H J, Cantin J L, Raymond S 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2733
- [4] Pearton S J, Hwang Y S, Ren F 2015 *JOM* **67** 1601
- [5] Lü L, Zhang J C, Li L, Ma X H, Cao Y R, Hao Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 057202 (in Chinese) [吕玲, 张进城, 李亮, 马晓华, 曹艳荣, 郝跃 2012 物理学报 **61** 057202]
- [6] Hao R J, Guo H X, Pan X Y, Lü L, Lei Z F, Li B, Zhong X L, Ouyang X P, Dong S J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 207301 (in Chinese) [郝蕊静, 郭红霞, 潘霄宇, 吕玲, 雷志锋, 李波, 钟向丽, 欧阳晓平, 董世剑 2020 物理学报 **69** 207301]
- [7] Jiang R, Zhang E X, McCurdy M W, Chen J, Shen X, Wang P, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Kaun S W, Kyle E C H, Speck J S, Pantelides S T 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 218
- [8] Pearton S J, Ren F, Patrick E, Law M E, Polyakov A Y 2016 *ESC J. Solid State Sc.* **5** Q35
- [9] Bazzoli S, Girard S, Ferlet-Cavrois V, Baggio J, Duhamel O 2007 9<sup>th</sup> *European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems* Deauville France, September 10–14, 2007 p1
- [10] Kuboyama S, Maru A, Shindou H, Ikeda N, Hirao T, Abo H, Tamura T 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2734
- [11] Martinez M J, King M P, Baca A G, Allerman A A, Armstrong A A, Klein B A, Douglas E A, Kaplar R J, Swanson S E 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 344
- [12] Rostewits M, Hirche K, Latti J, Jutzi E 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 2525
- [13] Sonia G, Brunner F, Denker A, Lossy R, Mai M, Opitz-Coutureau J, Pensl G, Richter E, Schmidt J, Zeimer U, Wang L, Weyers M, Wurfl J, Trankle G 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3661
- [14] Lei Z, Guo H, Tang M, Chang Z, Hui C, Zhang Z 2016 16<sup>th</sup> *European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems* Bremen Germany, September 19–23, 2016 p1
- [15] Sasaki H, Hisaka T, Kadoiwa K, Oku T, Onode S, Ohshima T, Taguchi E, Yasuda H 2017 *Microelectron. Reliab.* **81** 312
- [16] Hu P P, Liu J, Zheng S X, Maaz K, Zeng J, Zhai P F, Xu L J, Cao Y R, Duan J L, Li Z Z, Sun Y M, Ma X H 2018 *Nucl. Instrum. Meth. B* **430** 59
- [17] Challa S R, Vega N A, Mueller N A, Kristukat C, Debray M E, Witte H, Dadgar A, Strittmatter A 2021 *IEEE T. Electron Dev.* **68** 24
- [18] Wei F 2007 *M. S. Thesis* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [魏峰 2007 硕士学位论文 (上海: 复旦大学)]
- [19] Tartarin J G 2011 21<sup>th</sup> *International Conference on Noise and Fluctuations* Toronto, Canada, June 12–16, 2011 p452
- [20] Liu Y A, Zhuang T Q, Du L, Su Y H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 140703 (in Chinese) [刘宇安, 庄奕琪, 杜磊, 苏亚慧 2013 物理学报 **62** 140703]
- [21] Cai Y, Zhou Y, Lau K M, Chen K J 2006 *IEEE T. Electron Dev.* **53** 2207
- [22] Sitvestri M, Uren M J, Killat N, Marcon D, Kuball M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 043506
- [23] Ghibaudo G, Roux O, Nguyen-Duc C, Balestra F, Brini J 1991 *Phys. Status Solidi* **124** 571
- [24] Watkins T B 1959 *Proceed. Phys. Soc.* **73** 59
- [25] Vodapally S, Jang Y I, Kang I M, Cho I T, Lee J H, Bae Y, Ghibaudo G, Cristoloveanu S, Im K S, Lee G H 2017 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **38** 252
- [26] Chen Y Q, Zhang Y C, Liu Y, Liao X Y, Huang Y 2018 *IEEE Trans. Electron Dev.* **65** 1321
- [27] Hooge F N 1994 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **41** 1926
- [28] Achouche M, Biblemont S 1996 *Electron. Lett.* **32** 1326

# Effect of heavy ion radiation on low frequency noise characteristics of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors\*

Lü Ling<sup>1)</sup> Xing Mu-Han<sup>1)</sup> Xue Bo-Rui<sup>1)</sup> Cao Yan-Rong<sup>2)†</sup> Hu Pei-Pei<sup>3)</sup>  
Zheng Xue-Feng<sup>1)</sup> Ma Xiao-Hua<sup>1)</sup> Hao Yue<sup>1)</sup>

1) (School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

3) (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

( Received 8 July 2022; revised manuscript received 30 October 2023 )

## Abstract

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistor (HEMT) has important application prospects in satellite communication, radar, nuclear reactors and other extreme environments, owing to its excellent electrical performance and strong radiation resistance. Heavy ion radiation mainly causes single-event effect and displacement damage effect in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT device. In this work, the displacement damage defects introduced by heavy ion radiation are analyzed in detail. With the increase of heavy ion radiation influence, more defects are introduced by displacement damage. These defects reduce the two-dimensional electron gas (2DEG) concentration through carrier capture and removal effect, and reduce the carrier mobility through scattering mechanism, resulting in gradual degradation of the electrical characteristics of the device. In this work, AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistors are irradiated by <sup>181</sup>Ta<sup>32+</sup> ions with fluences of  $1 \times 10^8$  ions/cm<sup>2</sup>,  $1 \times 10^9$  ions/cm<sup>2</sup> and  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>. The electrical characteristics, EMMI and low-frequency noise characteristics of the device before and after heavy ion radiation are measured. The results show that heavy ion radiation can lead to the degradation of electrical parameters. When the heavy ion radiation dose reaches  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>, the electrical characteristics of the device deteriorate seriously, the threshold voltage shifts forward by 25%, and the drain saturation current deteriorates obviously. The defect locations introduced by irradiation are analyzed by EMMI test, and it is found that the number of "hot spots" increases significantly after the having been irradiated by heavy ions with a fluence of  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>, indicating that the radiation leads to the increase of defect density and serious damage to the device. Through the noise test, it is found that with the increase of the radiation fluence, the current noise power spectral density gradually increases. When the fluence reaches  $1 \times 10^{10}$  ions/cm<sup>2</sup>, the defect density increases to  $3.19 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>·eV<sup>-1</sup>, and the Hooge parameter increases after having been irradiated by heavy ions. We believe that the radiation leads to the defect density and parasitic series resistance of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT device to increase, resulting in larger Hooge parameters. Through analyzing the variation of the normalized power spectral density of the drain current noise with bias voltage, it is found that the defects caused by heavy ion radiation will cause the parasitic series resistance to increase.

**Keywords:** heavy ion radiation, Ga<sub>N</sub>, high electron mobility transistor, low frequency noise

**PACS:** 61.80.-x, 71.55.Eq

**DOI:** 10.7498/aps.73.20221360

\* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12035019, 62234013).

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

## 重离子辐射对AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管低频噪声特性的影响

吕玲 邢木涵 薛博瑞 曹艳荣 胡培培 郑雪峰 马晓华 郝跃

## Effect of heavy ion radiation on low frequency noise characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors

Lü Ling Xing Mu-Han Xue Bo-Rui Cao Yan-Rong Hu Pei-Pei Zheng Xue-Feng Ma Xiao-Hua Hao Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 036103 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20221360

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20221360>

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

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管温度传感器特性

Characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor temperature sensor

物理学报. 2020, 69(4): 047201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190640>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管的栅极电容模型

Gate capacitance model of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2021, 70(21): 217301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210700>

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GaIn/InAlN高电子迁移率晶体管性能的影响

Effect of structure parameters on performance of N-polar GaIn/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GaIn基高电子迁移率晶体管陷阱效应机理

Mechanisms of trapping effects in short-gate GaIn-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>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管器件电离辐照损伤机理及偏置相关性研究

Ionizing radiation damage mechanism and biases correlation of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor devices

物理学报. 2020, 69(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191557>