

## AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管器件中子位移损伤效应及机理

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

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

Hao Rui-Jing Guo Hong-Xia Pan Xiao-Yu Lü Ling Lei Zhi-Feng Li Bo Zhong Xiang-Li Ouyang Xiao-Ping Dong Shi-Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 207301 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200714

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200714>

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

AlGaN/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 AlGaN/GaN high electron mobility transistor devices

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

AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管温度传感器特性

Characteristics of AlGaN/GaN high electron mobility transistor temperature sensor

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

基于凹槽结构抑制AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管电流崩塌效应

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

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

具有部分本征GaN帽层新型AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管特性分析

Characteristic analysis of new AlGaN/GaN high electron mobility transistor with a partial GaN cap layer

物理学报. 2017, 66(16): 167301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.167301>

具有p-GaN岛状埋层耐压结构的横向AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管

High breakdown voltage lateral AlGaN/GaN high electron mobility transistor with p-GaN islands buried buffer layer for power applications

物理学报. 2017, 66(24): 247302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.247302>

AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管中二维电子气的极化光学声子散射

Polar optical phonon scattering of two-dimensional electron gas in AlGaN/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(15): 157303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200250>

# AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管器件 中子位移损伤效应及机理

郝蕊静<sup>1)</sup> 郭红霞<sup>1)2)3)†</sup> 潘霄宇<sup>3)</sup> 吕玲<sup>4)</sup> 雷志锋<sup>2)</sup>  
李波<sup>1)</sup> 钟向丽<sup>1)</sup> 欧阳晓平<sup>1)3)</sup> 董世剑<sup>1)</sup>

1) (湘潭大学材料与工程学院, 湘潭 411105)

2) (工业和信息化部电子第五研究所, 电子元器件可靠性物理及其应用技术国家重点实验室, 广州 510610)

3) (西北核技术研究院, 西安 710024)

4) (西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2020 年 5 月 12 日收到; 2020 年 6 月 16 日收到修改稿)

针对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管器件和异质结构在西安脉冲反应堆上开展了中子位移损伤效应研究, 等效 1 MeV 中子注量为  $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ . 测量了器件在中子辐照前后的直流特性和  $1/f$  噪声特性, 并对测试结果进行理论分析, 结果表明: 中子辐照在器件内引入体缺陷, 沟道处的体缺陷通过俘获电子和散射电子, 造成器件电学性能退化, 主要表现为阈值电压正漂、输出饱和漏电流减小以及栅极泄漏电流增大. 经过低频噪声的测试计算得到, 中子辐照前后, 器件沟道处的缺陷密度由  $1.78 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$  增大到了  $1.66 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ . 采用  $C-V$  测试手段对肖特基异质结进行测试分析, 发现沟道载流子浓度在辐照后有明显降低, 且平带电压也正向漂移. 分析认为中子辐照器件后, 在沟道处产生了大量缺陷, 这些缺陷会影响沟道载流子的浓度和迁移率, 进而影响器件的电学性能.

**关键词:** AlGaIn/GaN, 中子辐照, 位移损伤,  $1/f$  噪声

**PACS:** 73.40.Kp, 73.40.-c, 71.55.Eq, 61.80.Hg

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200714

## 1 引言

GaN 材料具有优异的物理和化学性能, 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, 适用于制造高频大功率器件<sup>[1]</sup>. 同时, 相比于 GaAs 材料和 Si 材料, GaN 材料的禁带宽度更大, 因此它的抗辐射性能更好, 在航空航天领域有着更广阔的应用前景<sup>[2,3]</sup>. 然而, 空间环境对器件的可靠性要求较高, 粒子辐射对器件造成的位移损伤效应会影响其长期稳定地工作, 目前这一问题限制着 GaN 器件在航空航天领域的应用<sup>[4]</sup>.

中子是核辐射环境中造成半导体器件位移损伤效应的主要粒子之一. 近几年来, 国内外对 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 器件开展了一些中子辐照实验研究. 2010 年 Gu 等<sup>[3]</sup>对中子辐照 AlGaIn/GaN HEMT 器件的电特性进行研究, 发现当辐照注量低于  $10^{14} \text{ n/cm}^2$  时, 器件的电学特性无明显变化, 而栅极泄漏电流有所增加. 2011 年 Wang 等<sup>[1]</sup>对 AlGaIn/GaN HEMT 器件建立了中子原位测试技术和辐照效应实验方法, 研究了电离效应和位移效应对器件电学性能的影响, 发现阈值电压、漏电流和栅泄漏电流是中子辐照损伤的敏感参数. 2018 年 Zhang 等<sup>[5]</sup>在室温下

† 通信作者. E-mail: guohxnint@126.com

用 1 MeV 的中子对 p-GaN 功率晶体管器件进行注量为  $1.5 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$  辐照实验, 辐照后器件的阈值电压没有发生明显变化, 栅极电压比较大时, 饱和漏电流在辐照后减小. 根据目前国内外对 GaN 基 HEMT 器件的中子辐照实验研究可以看出, 中子在一定注量时会对器件的电学特性产生影响, 比如饱和漏电流、跨导和阈值电压等, 研究位移损伤效应对器件性能的影响是整个器件性能研究中很重要的一部分. 并且, 对于位移损伤引起的器件性能的退化机制, 很多研究者都认为是在禁带中引入了缺陷造成的, 而缺陷种类及缺陷密度的变化, 尚未形成一个统一的认识. 所以, 采用新的表征手段来表征位移损伤造成的缺陷影响至关重要.

$1/f$  噪声是一种在半导体器件中功率谱密度与频率成反比的随机涨落现象, 它可以反映出半导体材料与器件的潜在缺陷<sup>[6]</sup>. 与材料质量相关的压电极化效应, 或者热载流子在源漏区与陷阱的相关作用, 导致的表面态和深能级缺陷的俘获和发射过程都可以用  $1/f$  噪声测试表征. 采用  $1/f$  噪声手段, 可以对器件界面处的陷阱能量和空间分布进行计算分析, 也可得到辐照前后的缺陷浓度变化<sup>[7-9]</sup>. 2015 年, 刘远等<sup>[10]</sup> 采用  $1/f$  噪声的分析方法对电离辐射前后的部分耗尽绝缘体上硅器件进行测试分析, 实验发现器件背栅平带电压噪声功率谱密度增大, 埋氧化层内的陷阱电荷密度在辐射后增多. 2020 年, 董世剑等<sup>[11]</sup> 针对 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行了  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线电离辐照实验, 实验采用  $1/f$  噪声的分析方法, 发现电离辐照会在器件氧化物层内诱生缺陷电荷和界面态, 从而影响器件的电学性能. 本论文采用  $1/f$  噪声的表征手法推断出了缺陷主要产生的区域, 并对中子辐照前后的器件内缺陷浓度进行了详细的计算. 同时, 本文针对 AlGaIn/GaN 异质结构进行了中子辐照实验, 利用  $C-V$  测试的方法, 分析了中子辐照引入的体缺陷对载流子浓度的影响. 虽然现在已有部分研究者做了中子辐照电学特性研究的相关实验, 但是关于  $1/f$  噪声的特性却少有报道, 本文将器件的电学特性与  $1/f$  噪声特性结合起来, 深入分析了中子位移损伤效应对器件的影响, 同时针对器件的异质结构也开展了辐照实验, 为器件的损伤机理分析提供了更有价值的参考.

## 2 实验

### 2.1 实验样品

本次实验选用的器件结构简图如图 1 所示. 该器件采用金属-有机化学气相沉积 (MOCVD) 法在碳化硅 (0001) 晶面衬底上生长了 AlGaIn/GaN 异质结构. 该外延结构从衬底向上由核层  $2 \mu\text{m}$  厚的非故意掺杂 GaN 层和  $20 \text{ nm}$  厚的非故意掺杂  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$  势垒层组成. 采用  $\text{Cl}_2$  反应离子刻蚀 (RIE) 进行台面隔离. 电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au ( $20 \text{ nm}/160 \text{ nm}/55 \text{ nm}/45 \text{ nm}$ ) 在  $850^\circ\text{C}$  下连续退火  $30 \text{ s}$ , 实现了欧姆接触. 接着是  $60 \text{ nm}$  的等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) SiN 钝化层. 用 RIE 方法去除栅区 SiN, 然后沉积 Ni/Au/Ni ( $45 \text{ nm}/200 \text{ nm}/20 \text{ nm}$ ) 金属堆, 形成肖特基接触. 器件栅长  $1 \mu\text{m}$ , 栅宽  $50 \mu\text{m}$ , 栅源间距  $2.5 \mu\text{m}$ , 源漏间距  $10 \mu\text{m}$ .

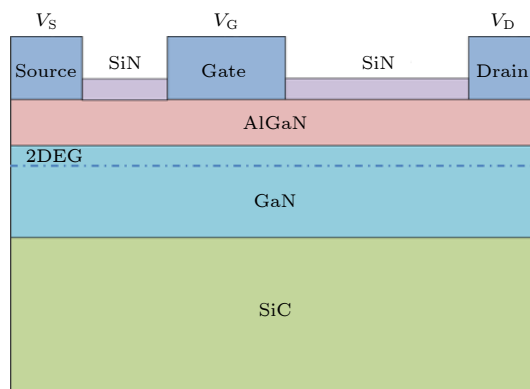


图 1 AlGaIn/GaN HEMT 器件结构图

Fig. 1. Structure diagram of AlGaIn/GaN HEMT device.

### 2.2 实验设置

中子辐照实验在西安脉冲反应堆开展, 该辐照场是中子和伽马射线的混合场, 实验过程取  $1 \text{ MeV}$  等效中子注量, 脉冲反应堆中的屏蔽金属盒可以调节中子和伽马射线之比, 本次实验采用的  $n/\gamma$  比为  $6.1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2\cdot\text{rad}$  (Si). 实验过程中, 反应堆  $1 \text{ MeV}$  等效中子注量达到  $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  即停止辐照, 器件在辐照过程中不加偏置, 实验温度为室温. 利用半导体参数分析仪 Agilent B1500 对实验器件进行电学性能测试, 并使用博达微科技快速低频噪声测量系统 NC300 对器件进行低频噪声测试, 对性能完好的器件进行记录并保存测试数

据. 测试参数设置如表 1 所列,  $V_G$  为栅极电压,  $V_D$  为漏极电压,  $V_S$  为源极电压,  $V_{STEP}$  为电压步长.

表 1 实验参数  
Table 1. Experimental parameters.

直流测试	参数 V/V
转移特性	$V_G = -6 \sim -2$ , $V_D = 10$ , $V_{STEP} = 0.1$
输出特性	$V_D = 0 \sim 10$ , $V_G = -4 \sim -1$ , $V_{STEP} = 1.0$
栅特性	$V_G = -10 \sim -2$ , $V_D = V_S = 0$
低频噪声测试	$V_G = -3.5 \sim -2.0$ , $V_{STEP} = 0.1$ , $V_D = 10$ , $V_S = 0$

### 3 实验结果分析

#### 3.1 AlGaIn/GaN HEMT 器件电学特性变化

对中性辐照前后的 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行电学特性敏感参数测试分析, 发现器件的电学特性在中性辐照后有明显退化. 辐照前后的转移特性曲线和输出特性曲线如图 2 和图 3 所示.

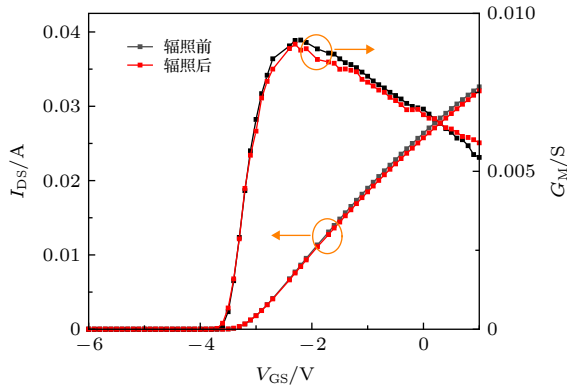


图 2 中性辐照前后 AlGaIn/GaN HEMT 器件转移特性曲线  
Fig. 2. Transfer characteristic curve of AlGaIn/GaN HEMT device before and after irradiation.

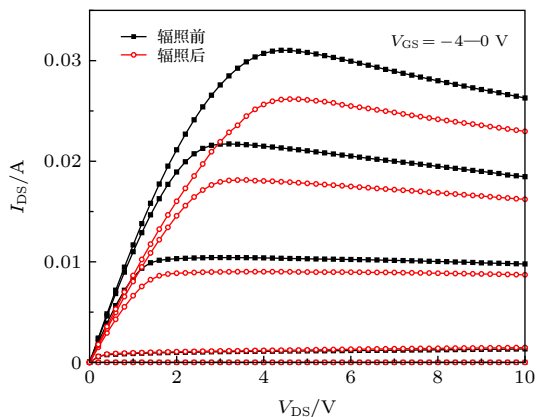


图 3 中性辐照前后 AlGaIn/GaN HEMT 器件输出特性曲线  
Fig. 3. Output characteristic curves of AlGaIn/GaN HEMT devices before and after irradiation.

从图 2 和图 3 中可以看出, 中性辐照后器件的跨导和输出饱和漏电流都有所降低, 计算得出辐照后跨导仅降低了 3%, 且最高跨导对应的栅压没有发生改变, 阈值电压经计算发现只有轻微的正漂, 而输出饱和漏电流却有明显的降低, 这些变化说明器件沟道内的载流子浓度和迁移率发生了变化.

由于 AlGaIn/GaN HEMT 器件在栅极采用肖特基接触, 在异质结处有很强的极化效应, 所以器件工作方式主要是耗尽模式. 当在肖特基栅极上加一个负的偏压时, 器件沟道内的二维电子气将会被耗尽, 这一电压就是晶体管的阈值电压, 它是 HEMT 器件中最重要的电学参数之一, 表示为<sup>[12]</sup>

$$V_{th}(x) = \phi_B(x) - \frac{qN_d d_d^2}{2\varepsilon(x)} - \Delta E_c(x) - \frac{\sigma(x)}{\varepsilon(x)}, \quad (1)$$

其中  $V_{th}$  是阈值电压,  $d_d$  是掺杂的 AlGaIn 层厚度,  $N_d$  是 AlGaIn 层的掺杂浓度,  $\phi_B(x)$  是肖特基势垒高度,  $\Delta E_c(x)$  是导带不连续,  $\varepsilon(x)$  是 AlGaIn 的介电常数,  $x$  是 AlGaIn 中铝的摩尔组分,  $\sigma(x)$  为异质结界面感生的极化电荷密度. 器件中的二维电子气主要是由极化电荷引起的,  $\sigma(x)$  可表示为<sup>[13]</sup>:

$$\sigma(x) = P_{sp}(\text{AlGaIn}) - P_{sp}(\text{GaN}) + P_{pz}(\text{AlGaIn}) - P_{pz}(\text{GaN}). \quad (2)$$

从而, 二维电子气中的总电荷可以根据泊松方程 (Poisson equation) 和薛定谔方程 (Schrödinger equation) 求出来, 设只有两种初始的量子态  $E_0$  和  $E_1$ , 则二维电子气的总电荷数  $n_s$  表示为<sup>[14]</sup>

$$n_s = DkT \ln \left\{ \left[ 1 + \exp \left( \frac{E_F - E_0}{kT} \right) \right] \times \left[ 1 + \exp \left( \frac{E_F - E_1}{kT} \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

其中  $D = 4\pi m^*/h^2$  是导带密度,  $m^* = 0.20m^0$  是电子有效质量,  $E_F$  是二维势阱的费米能级,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $T$  是温度. 则在耗尽近似的情况下, 二维电子气中的总电荷  $n_s$  可以表示为<sup>[14]</sup>:

$$n_s = \frac{\varepsilon(x)}{qd} \left( V_{GS} - V_{th} - \frac{E_F}{q} \right), \quad (4)$$

其中,  $d$  是薄层电荷和栅极之间的距离,  $V_{GS}$  是栅极电压,  $E_F$  是二维势阱的费米能级. 根据上述公式, 可以知道阈值电压与载流子密度紧密相关, 载流子密度减小造成阈值电压增大, 这是由于中性辐照后在器件内产生类受主型缺陷, 俘获电子后导致载流子密度减小引起的. 根据电流密度方程, 器件沟道



内的源漏电流 ( $I_{DS}$ ) 和跨导 ( $G_m$ ) 分别表示为<sup>[15]</sup>:

$$I_{DS} = qWv(x)n_s(x), \quad (5)$$

$$G_m = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}, \quad (6)$$

其中,  $W$  是栅宽,  $v(x)$  是电子速度, 达到最大时为饱和电子速度  $v_s$ . 当沟道电场达到临界电场时, 电子速度就达到了饱和电子速度  $v_s$ , 但当沟道电场小于临界电场时, 沟道迁移率就决定了沟道电子速度, 当沟道电场没有达到临界电场时, 电流表示为<sup>[15]</sup>:

$$I_{DS} = \mu W \frac{\varepsilon}{d} (V_{GS} - V_{ch}(x) - V_{th}) \frac{dV_{ch}}{dx}, \quad (7)$$

其中,  $V_{ch}$  是沟道  $x$  处的电势,  $\mu$  是沟道载流子迁移率, 由于在栅源和栅漏之间存在着寄生电阻  $R_S$  和  $R_D$ , 则栅极下方沟道内的电势边界条件分别表示为<sup>[15]</sup>:

$$V_{ch}(L) = V_{DS} - R_D I, \quad (8)$$

$$V_{ch}(0) = R_S I. \quad (9)$$

根据 HEMT 器件沟道长短, 使  $V_{GT}$  表示长沟道器件的饱和电压,  $V_L$  表示短沟道器件的饱和电压,  $V_{DS}$  表示漏极电压, 故当器件在线性区域工作时, 电流表示为<sup>[15,16]</sup>:

$$I_{DS} = \beta V_{GT} [V_{DS} - (R_S + R_D) I_{DS}], \quad (10)$$

其中  $\beta$  为跨导系数, 表示为

$$\beta = W\mu\varepsilon_1 / (dL). \quad (11)$$

当器件在饱和区工作时, 电子速度达到最大, 即达到沟道电流饱和值  $I_{Dast}$ <sup>[15,16]</sup>:

$$I_{Dast} = \beta V_L \left[ \sqrt{V_L^2 + (V_{GT} - R_S I_{Dast})^2} - V_L \right]. \quad (12)$$

根据上述公式可以推断出影响器件敏感参数退化的主要因素. 中子辐照器件后, 会在器件内造成深能级缺陷以及一些电子陷阱, 从而产生载流子去除效应且增加陷阱隧穿. 根据实验结果的转移特性曲线可以看出, 中子辐照后, 器件的跨导和阈值电压都变化很小, 经过计算发现, 最高跨导仅仅降低了 3%, 阈值电压有轻微正漂, 这主要是因为中子辐照器件后在 GaN 层中引入了受主型陷阱<sup>[17]</sup>, 使得异质结界面的电场增大, 阈值电压正漂. 对比输出特性曲线发现, 输出饱和漏电流的退化较大, 联系 (7) 式可以看出, 这主要是因为沟道载流子迁移率的退化. 中子辐照器件后, 会在 HEMT 器件内产生不同种类的缺陷和缺陷簇, 部分缺陷会形成散射中心, 发生库仑散射, 使得二维电子气的迁移率退化. AlGaIn/GaN HEMT 器件的栅特性一直

备受关注, 本次实验器件在中子辐照后, 栅极泄漏电流有所增加, 如图 4 所示. 分析可得, 中子辐照器件后, 在 AlGaIn 层中引入辐照缺陷作为隧穿中心, 加大了栅极电流的隧穿几率, 肖特基势垒高度也随之降低.

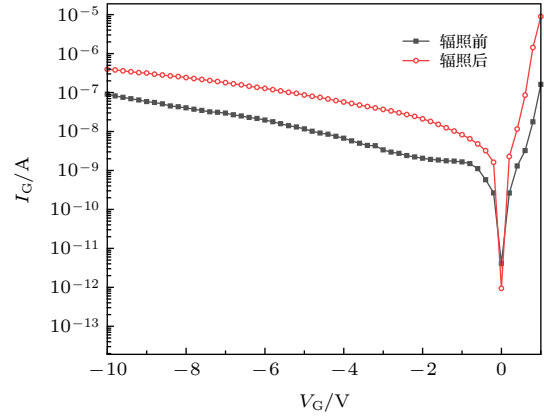


图 4 中子辐照前后 AlGaIn/GaN HEMT 器件栅特性曲线  
Fig. 4. Gate characteristic curve of AlGaIn/GaN HEMT device before and after irradiation.

### 3.2 AlGaIn/GaN HEMT 器件 $1/f$ 噪声特性变化

使用西安电子科技大学提供的低频噪声测试仪对中子辐照前后的 AlGaIn/GaN HEMT 器件进行低频噪声测试, 测试参数如表 1 所示. 测试过程中选取了多个不同的栅压, 经过数据处理发现, 在辐照前后的各个器件沟道电流归一化噪声功率谱密度变化一致, 如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 器件在经过中子注量  $1 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$  的辐照后, 沟道电流的归一化噪声功率谱密度有明显提高. 对于 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 可以通过测量不同栅压下的低频噪声功率谱密度, 计算分析沟道内的陷阱以及陷阱俘获现象. 在漏极偏压固定时, 可以测得电流功率谱密度  $S_{ID}$ , 基于 Mc Whorter's 数量波动模型可得, 归一化噪声功率谱密度  $S_{ID}/I_{DS}^2$  与栅极平带电压噪声功率谱密度  $S_{Vfb}$  有很好的关联性, 二者之间关系表示为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{S_{ID}}{I_{DS}^2} = \left( \frac{G_m}{I_{DS}} \right)^2 S_{Vfb}, \quad (13)$$

其中,  $S_{Vfb}$  只与器件界面附近的陷阱电荷、结构尺寸等参数有关,  $G_m$  是器件跨导. 取频率为 25 Hz 时的实验数据, 拟合出如图 6 所示的归一化沟道电流噪声功率谱密度随输出电流的变化曲线.

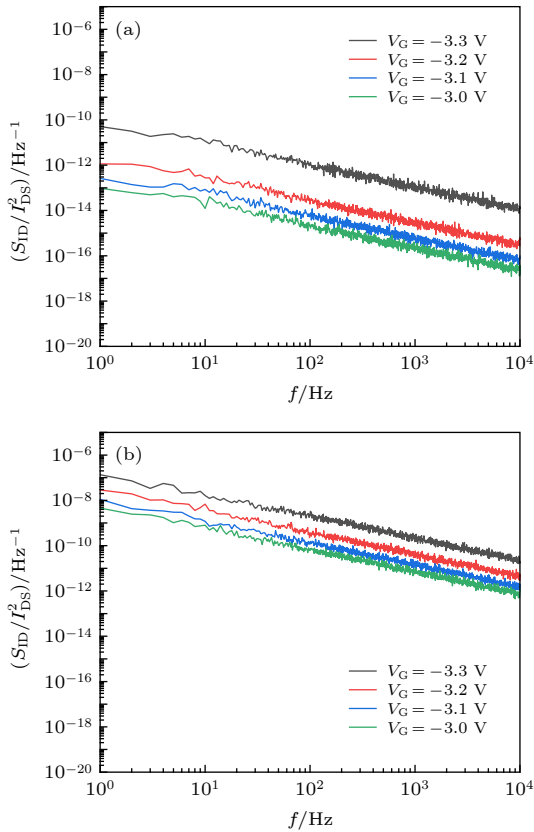


图 5 AlGaIn/GaN HEMT 器件辐照前与辐照后沟道电流归一化噪声功率谱密度 (a) 辐照前; (b) 辐照后  
Fig. 5. Normalized noise power spectral density of channel current in AlGaIn/GaN HEMT devices before and after irradiation: (a) Before irradiation; (b) after irradiation.

根据 (13) 式和图 6 可以看出, 辐照后的拟合曲线高于辐照前, 说明沟道界面附近的缺陷电荷俘获以及缺陷陷阱引起的载流子数量波动会产生沟道噪声. 而且辐照后的平带电压噪声功率谱密度  $S_{V_{fb}}$  高于辐照前, 而栅极平带电压噪声功率谱密度  $S_{V_{fb}}$  与器件内的缺陷密度  $N_{it}$  关系为 [19]:

$$N_{it} = \frac{W L f C_b^2}{q^2 k T \lambda} S_{V_{fb}}, \quad (14)$$

其中  $\lambda$  为 AlGaIn/GaN HEMT 器件的导带因子,  $\lambda = 0.5$  nm;  $W$  和  $L$  分别为器件的栅宽和栅长;  $C_b$  是器件中 AlGaIn 势垒层的电容. 利用 (14) 式可以计算得到实验前后器件内部缺陷的变化如表 2 所示.

表 2 的计算结果表明, 中子辐照会在器件内部引入新的缺陷, 使得器件内缺陷密度增大. 图 7 展示了典型结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件中噪声缺陷可能产生的位置以及噪声种类 [20,21].

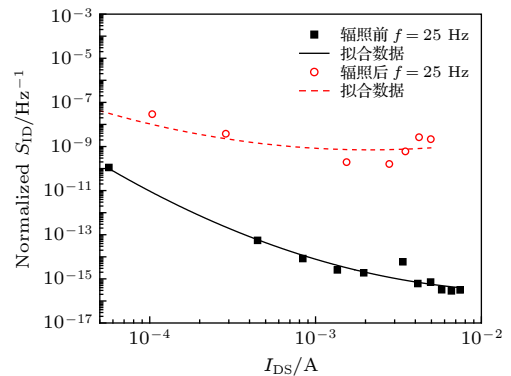


图 6 辐照前后归一化沟道电流噪声功率谱密度与输出电流的关系  
Fig. 6. Normalized channel current noise power spectral density versus channel current in the AlGaIn/GaN HEMT devices before and after irradiation.

表 2 辐照前后噪声参数变化  
Table 2. Noise parameter changes before and after irradiation.

参数	辐照前	辐照后
$S_{V_{fb}}/\text{V}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$	$1.56 \times 10^{-9}$	$1.45 \times 10^{-7}$
$N_{it}/\text{cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$	$1.78 \times 10^{12}$	$1.66 \times 10^{14}$

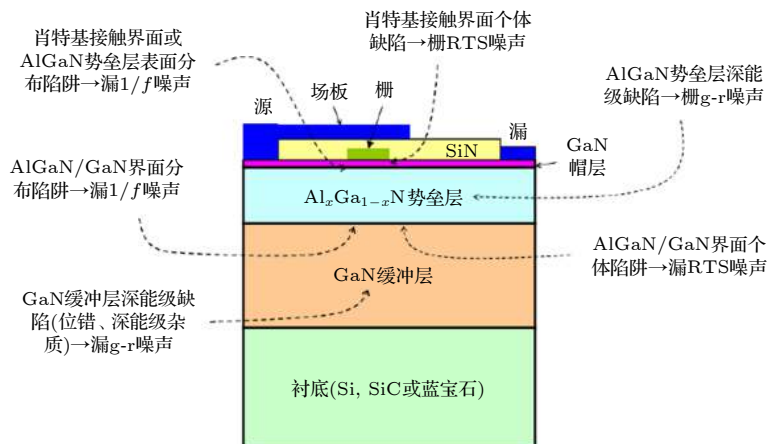


图 7 典型结构的 AlGaIn/GaN HEMT 器件中噪声-缺陷源位置 [20,21]  
Fig. 7. Location of noise-defect sources in AlGaIn/GaN HEMT devices with typical structure [20,21].

从图7中可以看出,  $1/f$  噪声主要是在 AlGaIn/GaN 界面以及 AlGaIn 势垒层与栅极界面处产生. 中子辐照 AlGaIn/GaN HEMT 器件后, 归一化沟道电流功率谱密度增大, 结合中子辐照器件引发位移损伤缺陷的物理过程进行分析. 中子不带电, 其入射到半导体材料内能够足够接近并撞击晶格原子, 使得晶格原子偏离原来的点阵位置而产生空位缺陷, 这些缺陷分布在 AlGaIn 势垒层以及器件沟道内, 使得沟道内归一化电流功率谱密度增大. 此外, 中子辐照在肖特基接触的栅极以及栅极下方的 AlGaIn 势垒层中产生了新的缺陷, 这些缺陷充当俘获中心和散射中心来俘获沟道载流子和散射电子, 使得载流子数量减小、迁移率降低, 造成阈值电压的正向漂移、饱和漏电流下降, 而在栅极诱发的缺陷又会作为隧穿中心辅助隧穿, 使得栅泄漏电流增大, 这与 3.1 节测得的电学特性相符合.

### 3.3 AlGaIn/GaN 异质结的中子辐照效应

根据以上实验结果可知, 中子辐照器件后引入的体缺陷会使得载流子数量减少, 迁移率降低, 然而这些体缺陷产生的位置仍然值得探讨, 所以同时针对体缺陷主要产生的位置开展了中子的辐照实验, 并利用  $C$ - $V$  测试的手段计算出辐照前后载流子浓度的变化. 实验采用的样品器件是针对 AlGaIn/GaN 异质结制作的一个肖特基二极管, 生长工艺与 3.1 节中的 HEMT 器件相同, 肖特基二极管的结构简图如图 8 所示, 实验条件与器件实验相同, 实验设置参数如表 3 所示.

对实验样品进行辐照前后的  $C$ - $V$  测试, 提取辐照前后不同频率下的  $C$ - $V$  数据作图, 图 9 展示了中子辐照前后的肖特基二极管在 1 MHz 时电容随偏置电压的变化曲线.

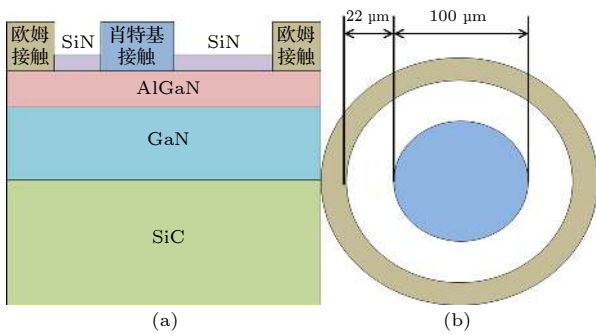


图 8 肖特基二极管器件结构图 (a) 剖面图; (b) 俯视图

Fig. 8. Schottky diode device structure diagram: (a) Cross-sectional view; (b) top view.

表 3 实验参数设置

Table 3. Experimental parameters.

直流测试	参数设置: $V/V$ , $F/kHz$
转移特性	$V_G = -6 \sim -2$ , $V_D = 10$ , $V_{STEP} = 0.1$
输出特性	$V_D = 0 \sim 10$ , $V_G = -4 \sim -1$ , $V_{STEP} = 1$
栅特性	$V_G = -10 \sim -2$ , $V_D = V_S = 0$
$C$ - $V$ 测试	$V_G = -6 \sim -1$ , $V_D = 0$ , $V_{STEP} = 0.05$ $F = 10, 50, 100, 500, 1000, 2000$

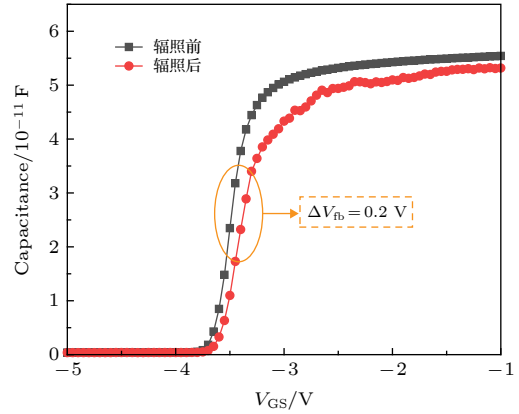


图 9 中子辐照前后的肖特基二极管在 1 MHz 时电容随偏置电压的变化

Fig. 9. Variation curves of capacitance with bias voltage of Schottky diode before and after neutron irradiation at 1 MHz.

从  $C$ - $V$  结果图可以看出, 辐照前, 器件的开启电压大约在  $-3.5$  V 左右. 在中子辐照以后, 平带电压  $\Delta V_{fb}$  有一个正向的漂移, 漂移值约 0.2 V 左右. 这是由于中子辐照在异质结处引入了体缺陷, 这些缺陷会形成俘获陷阱中心来俘获电子, 从而造成平带电压的正向漂移. 为了更进一步地分辨出这些缺陷所在的位置, 就需要知道中子辐照前后的载流子浓度变化, 载流子浓度  $N_{CV}$  可以通过 (15) 式 [22] 得到,

$$x = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{C}, \quad N_{CV} = -\frac{2}{q \varepsilon_r \varepsilon_0 A^2} \times \frac{1}{dC^{-2}/dV}, \quad (15)$$

其中,  $x$  是载流子距 AlGaIn 层的距离,  $C$  是在  $V_{GS}$  下每单位面积的肖特基势垒层电容,  $A$  是肖特基接触的面积,  $\varepsilon_r$  和  $\varepsilon_0$  分别是势垒层中材料的相对介电常数和真空介电常数. 基于图 9 和 (15) 式可以得到图 10 载流子浓度随深度的变化.

从图 10 可以很明显看出中子辐照后载流子浓度峰值明显下降, 这说明在中子辐照后有更多的电子被俘获. 推断这是由于二维电子气沟道内的部分电子被转移到了 AlGaIn 层的体缺陷内, 如图 11 所示. 这些被俘获的电子就引起了平带电压的正向漂移, 也就是发生了所谓的载流子去除效应.

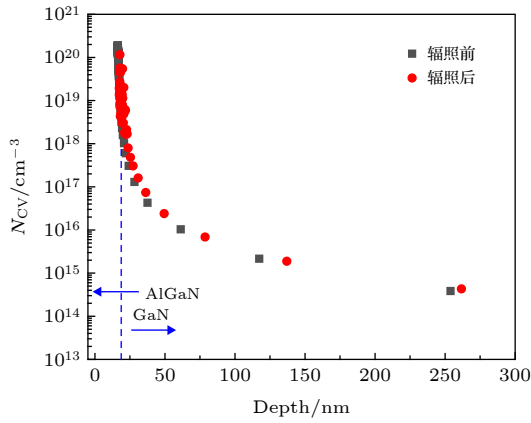


图 10 载流子浓度随深度的波动函数

Fig. 10. Fluctuation function of carrier concentration with depth.

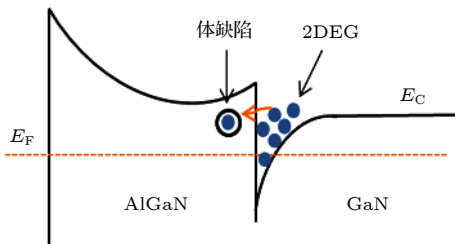


图 11 二维电子气沟道内电子转移到体缺陷示意图

Fig. 11. Schematic diagram of electron transfer to bulk defects in the two-dimensional electron gas channel.

为了证实这一点,就需要对载流子重分布对平带电压转移的影响进行定量评估,利用(16)式<sup>[23]</sup>进行定量评估,此时只考虑 AlGaIn 层中被俘获的电子对平带电压转移的影响,

$$\Delta V_{fb} = -\frac{1}{C_0} \int_0^{d_0} \frac{x [N_{CV}(x) - N'_{CV}(x)]}{d_0} dx, \quad (16)$$

其中,  $C_0$  是肖特基区域 AlGaIn 层中单位面积的电容值,  $d_0$  是 AlGaIn 层厚度,  $N_{CV}(x)$  和  $N'_{CV}(x)$  分别是辐照前后 AlGaIn 层中深度  $x$  时的电子浓度. 通过(16)式计算出  $\Delta V_{fb} = 0.19 \text{ V} \approx 0.2 \text{ V}$ . 该结果表明平带电压的漂移主要是由于 AlGaIn 层中的缺陷陷阱进行了电子俘获, 根据这些可以推断出在中子辐照后, AlGaIn 层中产生的体缺陷引发了载流子去除效应. 本次实验工作提供了一个直接的实验结果, 证明中子辐照后的体缺陷分布状况. 根据以上可以得出结论, 二维电子气沟道内的部分电子在中子辐照后会转移到 AlGaIn 层的体缺陷中, 同时, 转移的这部分电子对二维电子气沟道也有一个耗尽作用, 这就使得电子浓度降低, 在 HEMT 器件中, 它能引起输出饱和漏电流减少.

## 4 结 论

本文实验工作针对 AlGaIn/GaN HEMT 器件开展了中子位移损伤效应研究, 通过电学特性和  $1/f$  噪声特性表征方法对器件辐照前后的性能进行了测试表征, 实验结果发现中子辐照在器件沟道内引入的体缺陷会导致器件电学性能退化, 并且辐照前后器件沟道内的缺陷密度由  $1.78 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$  增大到了  $1.66 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ . 同时针对 AlGaIn/GaN 异质结构也进行了中子辐照实验, 利用  $C-V$  测试的方法得到了辐照前后器件内载流子浓度的变化, 并且推断出中子引入的体缺陷主要分布在 AlGaIn 层. 本实验研究结果可用于 AlGaIn/GaN HEMT 器件抗辐照加固设计方面.

在实验过程中, 得到了西安脉冲堆运行操作人员热情周到的服务, 他们精准可靠的辐照控制对项目顺利实施帮助良多, 在此深表感谢!

## 参考文献

- [1] 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]
- [2] Jun B, Subramanian S 2001 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **48** 2250
- [3] Gu W P, Hao Y, Yang L A 2010 *Phys. Status Solidi C* **7** 1991
- [4] Meneghesso G, Verzellesi G, Danesin F, Rampazzo F, Zanon F, Tazzoli A, Meneghini M, Zanoni E 2008 *IEEE Trans. Dev.* **8** 332
- [5] Zhang D X, Chen W, Luo Y H, Liu Y, Guo X Q 2018 *Appl. Phys.* **9** 53
- [6] Liu Y A, Zhuang Y 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]
- [7] Jayarman R, Sodini C G 1989 *IEEE Trans. Dev.* **36** 1773
- [8] Fleetwood D M, Shaneyfelt M R, Schwank J R 1994 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1965
- [9] Peng S Q, Du L, He L, Chen W H, Zhuang Y Q, Bao J L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5205 (in Chinese) [彭绍泉, 杜磊, 何亮, 陈伟华, 庄奕琪, 包军林 2008 *物理学报* **57** 5205]
- [10] Liu Y, Chen H B, He Y J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 078501 (in Chinese) [刘远, 陈海波, 何玉娟 2015 *物理学报* **64** 078501]
- [11] Dong S J, Guo H X, Ma W Y, Liti L, Pan 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]
- [12] White B D, Bataiev M, Goss S H and Brillson L J 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1934
- [13] Rajan S, Xing H, DenBaars S, Jena D 2004 *Appl. Phys. Lett.* **64** 1591
- [14] Rashmi A, Kranti S, Haldar, Gupta R S 2002 *Solid State Electron.* **51** 16
- [15] Rajan S, Xing H, DenBaars S, Jena D 2004 *Appl. Phys. Lett.*



- 84 1591
- [16] Delagebeaudeuf D, Linh N T 1982 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **6** 955
- [17] Xiong H D 2004 *Ph. D. Dissertation* (Nashville: Vanderbilt University)
- [18] Scofield J H, Fleetwood D M 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1567
- [19] Chen Y Q, Zhang Y C, Liu Y 2018 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **65** 1
- [20] Liu Y A 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [刘宇安 2014 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [21] Casey H C, Fountain G G, Alley R G, Keller B P 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 1850
- [22] Arulkumaran S, Egawa T, Ishikawa H 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 2186
- [23] Grove A S 1976 *Physics and Technology of Semiconductor Devices* (New York: John Wiley and Sons) pp267–271

# Neutron-induced displacement damage effect and mechanism of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistor

Hao Rui-Jing<sup>1)</sup> Guo Hong-Xia<sup>1)2)3)†</sup> Pan Xiao-Yu<sup>3)</sup> Lü Ling<sup>4)</sup>

Lei Zhi-Feng<sup>2)</sup> Li Bo<sup>1)</sup> Zhong Xiang-Li<sup>1)</sup>

Ouyang Xiao-Ping<sup>1)3)</sup> Dong Shi-Jian<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Material Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

<sup>2)</sup> (Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, China Electronic Product Reliability and Environmental Testing Research Institute, Guangzhou 510610, China)

<sup>3)</sup> (Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

<sup>4)</sup> (Key Lab of Wide Bandgap Semiconductor Material and Devices, School of Microelectronics, Xi'an University, Xi'an 710071, China)

( Received 12 May 2020; revised manuscript received 16 June 2020 )

## Abstract

In this paper, neutron-induced displacement damage effects of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> High electron mobility transistor (HEMT) device and heterostructure on the Xi'an pulse reactor are studied. The equivalent 1 MeV neutron fluence is  $1 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>. The direct-current characteristics and low frequency noise characteristics of the HEMT device are used to characterize the performances before and after being irradiated by the neutrons, and then the experimental results are analyzed theoretically. The analysis results showed that the displacement damage effect caused by the neutron irradiation will introduce the bulk defects into the device. The bulk defects at the channel cause the electrical performance of the device to degrade through trapping electrons and scattering electrons, which are mainly manifested as the drift of positive threshold voltage, the decrease of output saturation drain current, and the increase of gate leakage current. In order to further confirm the effect of neutron irradiation on the defect density of the device, we implement the low-frequency noise test and the calculation of the device, and the results show that the defect density at the channel of the device increases from  $1.78 \times 10^{12}$  cm<sup>-3</sup>·eV<sup>-1</sup> to  $1.66 \times 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>·eV<sup>-1</sup>, which is consistent with the results of the electrical characteristics test, indicating that the new defects introduced by neutron irradiation do degrade the electrical performance of the device. At the same time, the capacitor-voltage test is also carried out to analyze the Schottky heterojunctions before and after neutron irradiation. It is found that the channel carrier concentration is significantly reduced after irradiation, and the flat band voltage also drifts positively. The analysis shows that after irradiating the device with neutrons, a large number of defects will be generated in the channel, and these defects will affect the concentration and mobility of the channel carriers, which in turn will influence the electrical performance of the device. These experimental results can be used for designing the AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> high electron mobility transistor for radiationhard reinforcement.

**Keywords:** AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>, neutron irradiation, displacement damage, 1/f noise

**PACS:** 73.40.Kp, 73.40.-c, 71.55.Eq, 61.80.Hg

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200714

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