

磷化铟基高电子迁移率晶体管辐照效应 研究现状

方仁凤¹ 周书星¹ 曹文彧¹ 魏彦锋¹ 汪竞阳¹ 李树森² 颜家圣² 梁桂杰¹

1(湖北文理学院 低维光电材料与器件湖北省重点实验室 襄阳 441053)

2(湖北台基半导体股份有限公司 大功率半导体技术湖北省重点实验室 襄阳 441021)

摘要 磷化铟(InP)基高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor, HEMT)凭借高频、高增益、低噪声等特性,广泛应用于卫星、载人航天、深空探测等空间通信系统中,但空间环境中的电子、质子、中子等高能粒子会影响InP基HEMT性能,降低空间通信系统的可靠性。该文主要论述高能粒子辐射诱导缺陷对InP基HEMT器件直流(Direct Current, DC)特性、射频(Radio Frequency, RF)特性、跨导和扭结效应(Kink effect)的影响和退化机理,接着总结并分析了InP基HEMT抗辐射加固措施方面的研究进展。通过系统总结国内外InP基HEMT辐照效应研究进展,以期为研究InP基HEMT辐照效应损伤机制以及改进其抗辐射加固技术提供有价值的参考。最后,基于目前InP基HEMT辐照效应研究中仍存在的问题,提出了该器件抗辐射加固未来可重点关注的研究方向。

关键词 磷化铟, 高电子迁移率晶体管, 辐照效应, 辐射诱导缺陷, 抗辐射加固

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.230127

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.230127

Research progress on irradiation effect of InP-based high electron mobility transistors

FANG Renfeng¹ ZHOU Shuxing¹ CAO Wenyu¹ WEI Yanfeng¹ WANG Jingyang¹

LI Shusen² YAN Jiasheng² LIANG Guijie¹

1(Hubei Key Laboratory of Low Dimensional Optoelectronic Materials and Devices, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, China)

2(Hubei Key Laboratory of High Power Semiconductor Technology, Hubei TECH Semiconductor Co., Ltd, Xiangyang 441021, China)

Abstract Indium phosphide (InP)-based high electron mobility transistors (HEMTs) have been widely adopted in space communication systems such as satellites, manned spaceflight, and deep space exploration due to their high frequency and gain, and low noise. However, high-energy particles such as protons, electrons, and neutrons in a space environment affect the performance of InP-based HEMTs and reduce the reliability of space communication systems. This paper mainly discusses the influence and degradation mechanism of defects induced by high-energy particle irradiation on the direct current (DC) and radio frequency (RF) performance of InP-based HEMTs, as well as the transconductance and kink effect in the irradiation environment. Subsequently, the research progress of radiation-

国家自然科学基金(No.11705277)、湖北文理学院研究生教育质量工程项目(No.YZ3202405)、襄阳市科技计划项目(No.2022ABH006045)资助
第一作者: 方仁凤, 女, 1998年出生, 2021年毕业于湖北文理学院, 现为硕士研究生, 研究领域为化合物半导体材料与器件

通信作者: 周书星, E-mail: sxzhou@hbuas.edu.cn

收稿日期: 2023-10-13, 修回日期: 2024-05-10

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11705277), Graduate Quality Engineering Support Project of Hubei University of Arts and Science (No.YZ3202405), Xiangyang Science and Technology Project (No.2022ABH006045)

First author: FANG Renfeng, female, born in 1998, graduated from Hubei University of Arts and Sciences in 2021, master student, focusing on compound semiconductor materials and devices

Corresponding author: ZHOU Shuxing, E-mail: sxzhou@hbuas.edu.cn

Received date: 2023-10-13, revised date: 2024-05-10

hardening measures for InP-based HEMT devices is summarized and analyzed so as to provide the theoretical guidance for studying damage mechanism of InP based HEMT irradiation effect and improving its radiation-hardening technology. Finally, based on current challenges in the field, future research directions are proposed for radiation effects and radiation-hardening technologies of InP-based HEMTs.

Key words Indium phosphide, High electron mobility transistor, Irradiation effects, Radiation-induced defects, Radiation hardening

近几十年来,半导体射频器件作为通信系统中的重要组成部分,为满足通信系统工作频率的逐步提高,半导体射频器件的性能需要不断改进提升^[1-2]。III-V族化合物半导体材料凭借其直接带隙、高击穿电场和高电子迁移率等特性成为制作射频器件的理想材料^[3-4],而III-V族化合物的磷化铟基高电子迁移率晶体管(InP基HEMT(High Electron Mobility Transistor))凭借高迁移率二维电子气的异质结构,在射频器件领域具有很大的竞争优势^[5-7]。此外,随着电子束光刻(Electron Beam Lithography, EBL)及分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)等技术的发展^[2],推动化合物半导体器件的微/纳米级制备工艺提高,磷化铟基高电子迁移率晶体管性能提升到毫米波太赫兹波领域。目前,InP基HEMT凭借高频、高增益、低噪声和抗辐射等特性^[8-10],被认为是高频、高速、低噪声通信系统中半导体射频器件的最佳选择^[11],在卫星、载人航天、深空探测和其他空间通信系统中具有很大的应用潜力^[12-13]。

然而复杂多变的空间极端环境中包含电子、质子、中子等辐射粒子,这些辐射粒子使空间通信系统中的半导体器件产生电子-空穴对和缺陷,从而造成不同程度的性能退化^[14-16]。对于InP基HEMT,由辐射粒子引起的缺陷会通过载流子去除效应和缺陷散射效应导致载流子浓度和迁移率的降低,造成器件饱和电流减小、阈值电压负向移动、电流增益截止频率降低、最大振荡频率降低^[17-18],以及跨导“峰值崩溃”和kink效应等异常现象,严重影响空间通信系统运行的可靠性,因此,InP基HEMT的辐照效应和抗辐射加固研究对空间通信系统运行的可靠性具有重要意义。近年来,众多学者研究了空间辐射粒子对器件性能的影响,并从器件的结构设计和制作工艺上进行调整,从而提高InP基HEMT的抗辐射能力。

1 InP基HEMT辐照效应研究进展

空间中包含的辐射粒子主要有质子、电子、中子和 α 粒子等,这些辐射粒子会在半导体材料中产生位移损伤效应和电离损伤效应,进而会使InP基HEMT在异质结区域诱生空位缺陷或者在器件栅槽

表面诱生表面态缺陷,这些缺陷引起器件的载流子去除效应和散射效应,使沟道载流子浓度和迁移率有所降低,对InP基HEMT各种性能造成不同程度的损伤。下面主要分析高能辐射粒子对InP基HEMT的直流、射频、栅极特性的影响,以及器件出现的Kink效应和跨导“峰值崩溃”的异常现象。

1.1 辐射诱导缺陷形成分析

辐射诱导缺陷的形成分析是InP基HEMT辐照效应的一个重要研究热点。InP基HEMT在受到辐照后,会在器件结构中诱生缺陷,引起一系列性能退化的问题。目前的InP基HEMT辐照效应的研究通过软件仿真和实验相结合的方式,这种方式能够更深层地研究辐射粒子对器件的损伤机理。2016年,孙树祥等^[19-20]首先利用流体动力输运模型、Shockley-Read-Hall复合、Auger复合、辐射复合、密度梯度模型和迁移率高场饱和等模型在Sentaurus TCAD软件中模拟InP基HEMT的直流和频率特性,随后又在此基础上,将固定电荷作为表面态缺陷模型引入到泊松方程中,分析其对该器件直流和交流特性的影响,并与实际测试结果对比,验证以上模型的准确性,为研究InP基HEMT的辐照效应奠定基础。质子辐射效应的研究大多是通过仿真进行的,先在SRIM软件上采用蒙特卡罗方法计算出质子在靶材中的电离能损、位移能损沉积、质子射程及诱生空位缺陷信息等,并将得出的数据引入到Sentaurus TCAD软件的相关模型中,分析辐照对InP基HEMT器件性能的影响。多位学者在InP基HEMT的辐照仿真实验中发现,质子辐射过程中对器件性能退化起决定性作用的缺陷可能是受主缺陷(As空位缺陷)^[17,20-21],受主缺陷作为捕获中心捕获沟道中的自由电子,造成器件性能的退化^[17];随着质子辐射注量的增加,器件受辐照影响形成的损伤区从异质结区域转移到缓冲层区域,使器件的缓冲层区域产生空位缺陷,受主缺陷作为捕获中心,捕获沟道中的自由电子,从而导致器件性能退化^[20];此外,在仿真中还发现异质结区域空位缺陷的数量随辐照能量的增加呈现出先增加后减少的趋势,这是由于质子能量较低时,入射质子主要在栅金属层诱生空位缺陷,随着质子能量的增加,入射质子会主要分布在异质结区

域,诱生的空位缺陷会随能量的增加而增加,但当入射质子的能量达到一定的程度时,入射质子的运动轨迹就会趋于一条直线,入射质子留在异质结区域的数量会减少,与晶格原子碰撞的几率减少,使得异质结区域内空位缺陷的数量减少^[17,20-21]。质子辐射使 InP 基 HEMT 器件中产生受主缺陷(As 空位缺陷)、施主缺陷(Ga 和 In 空位缺陷),而电子对 InP 基 HEMT 的辐照效应研究没有像质子辐照那样对空位缺陷的类型和缺陷数量做过详细的研究。但在多个文献中提到电子辐射会在 HEMT 器件中产生界面缺陷、表面态缺陷以及体缺陷^[22-24],如图 1 所示,其中表面态缺陷主要是由于外延层材料表面的晶格常数受到破坏,产生悬挂键,并在栅-源和栅-漏区域的表面形成表面态缺陷^[20],界面缺陷主要是不同材料接触界面之间产生的缺陷。多位学者在实验中发现电子辐射会在 HEMT 的势垒层诱生晶格缺陷,引起载流子散射效应,进而影响器件的性能^[25-26]。另外,2020 年,孙树祥等^[22-23]在电子辐射对 InP 基 HEMT 性能影响的实验中发现,电子辐射会在器件的体材料中诱生缺陷以及接触界面诱生表面态缺陷。2022 年,Zhang 等^[27]根据实验结果提出辐射粒子导致 HEMT 器件性能退化的具体情景:高能粒子与晶格原子发生碰撞,使晶格原子从晶格位置脱离,产生大量间隙原子和空位^[28-29],在热扩散的作用下,空位和间隙原子快速复合,并且少量空位和间隙原子从界面和表面迁移,从而形成稳定的缺陷,对 HEMT 器件而言,辐照产生的缺陷类别中界面缺陷可能比体缺陷要多。

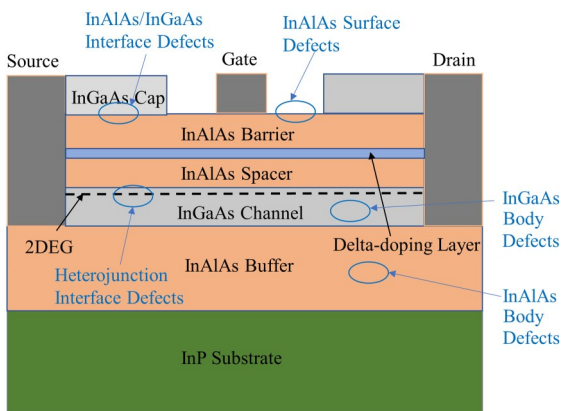


图 1 InP 基 HEMT 中缺陷位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of a defect location in an InP-based HEMT

1.2 直流特性影响

InP 基 HEMT 的直流特性主要包含沟道电流(I_{DS})、跨导(g_m)、夹断电压(V_p)以及导通电阻(R_{on})等。辐射粒子会在器件中产生各种缺陷,影响载流

子迁移率和浓度的变化,进而造成器件性能的退化。早在 2002 年,Bongim 等^[30]在实验中发现辐射粒子会在异质结区域内产生晶格缺陷,造成载流子去除效应,导致载流子迁移率下降。2014 年,Anderson 等^[31]通过霍尔测量研究电子辐射对 HEMT 的影响,发现电子辐射对器件 I_{DS} 和 g_m 造成不同程度的退化,这主要是由于电子辐射在 HEMT 器件异质结区域引入缺陷,影响到载流子的运动轨迹,使迁移率发生变化;缺陷作为散射中心,增加对载流子的库伦散射,导致载流子迁移率降低;此外缺陷会捕获沟道中的电子,使载流子浓度降低。2019 年,孙树祥等在电子辐射剂量大小对 InP 基 HEMT 性能影响的实验中也发现类似的退化现象,随着电子辐射剂量的增加,器件的 I_{DS} 减小、 g_m 值减小、饱和沟道电流($I_{D,sat}$)和导通电阻(R_{on})的退化程度增加。由图 2 中可以看出,当电子注量为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 时,载流子浓度略有增加,载流子迁移率降低 25.9%^[32]。这可能因为有部分入射电子留在器件结构中^[33],残留的电子和诱导的缺陷使载流子迁移率因散射效应而降低;此外,残留的电子可能会重新排列成可以移动的缺陷态,导致一些电子从缺陷位置释放出来,使载流子浓度随着电子注量的增加而略有增加,因此,InP 基 HEMT 直流性能退化主要由载流子迁移率的降低导致^[22,32]。此外,多位学者在实验中发现当 HEMT 器件受到辐照后,界面材料的粗糙程度会有所增加^[34-35],2020 年,孙树祥等^[22]在电子辐射对 InP 基 HEMT 退化机制的实验中也发现类似的现象,图 3 显示了通过原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM) 观测到的电子辐射前后 InAlAs/InGaAs 异质结结构的表面形态,可以看出器件在受到电子辐照后,异质结表面变得更加粗糙,增加载流子的扩散,使载流子迁移率降低,导致 g_m 的降低。此外,2021 年,周书星等^[36]研究电子辐射对 InP 基

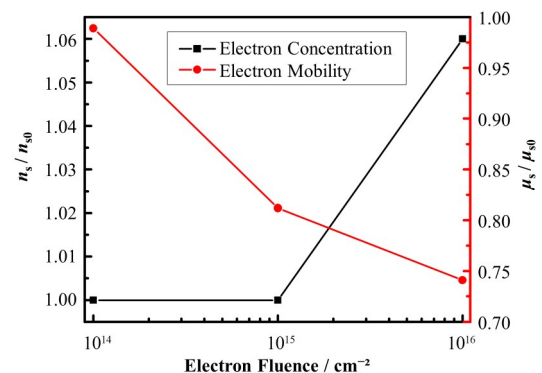


图 2 电子浓度和迁移率随电子注量的变化^[32]
Fig.2 Electron concentration and mobility as a function of electron fluence^[32]

HEMT 二维电子气 (Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG) 电学特性的影响, 在实验中发现, 位移损伤效应会在量子阱区产生缺陷能级, 并影响 2DEG 浓度和迁移率。但是由于在高能电子束的辐射下, 辐射诱导缺陷的产生和复合会达到动态平衡, 所以, 当电子辐射注量逐渐增加时, 缺陷浓度不会增加太多, 2DEG 浓度和迁移率的下降速度会逐渐减慢直至达到饱和。

质子辐射也会影响 InP 基 HEMT 器件的直流特性, 多位学者利用仿真软件发现质子辐射在 InP 基 HEMT 中诱生的 As 受主缺陷会在半导体材料禁带中引入缺陷能级, 缺陷能级作为受主补偿中心, 通过载流子去除效应降低二维电子气 (2DEG) 浓度, 导致 InP 基 HEMT 的漏极电流和跨导明显下降^[17,21,37]。2018 年, 孙树祥等^[20,38]通过 SRIM 软件和 Sentaurus TCAD 软件仿真质子在入射时不同角度对 InP 基 HEMT 性能的影响, 结果表明: 当质子入射角度为 30° 时, 质子的射程刚好处于 HEMT 沟道层的边缘, 质子辐射在异质结区域内产生的空位缺陷最多, 使

沟道中载流子浓度的降低幅度最大, 导致沟道电流 (I_{DS}) 和跨导 (g_m) 的退化最为严重。同年, 孙树祥等考虑器件在实际辐照过程中, 对 InP 基 HEMT 产生的缺陷不是均匀分布, 所以在原先电荷控制模型中引入非均匀分布的受主缺陷, 并在仿真软件上得出器件在辐照过后的转移特性和频率特性。从图 4(a) 中可以看出, 随着辐射注量的增加, I_{DS} 和 g_m 退化越来越严重。因为质子辐射注量的增加, 导致器件中产生受主缺陷的数量随之增加, 使沟道中自由电子被捕获的概率增加, 从而降低沟道中的载流子浓度, 引起夹断电压 (V_p) 的正向移动、 I_{DS} 和 g_m 的降低; 此外, 载流子浓度的降低也会导致沟道电阻增加, 降低电子的传导能力, 也会使 I_{DS} 有所降低^[18]。此外, 受主缺陷引起额外的反向调制同样会影响 V_p 的正向偏移^[38]。多位学者研究发现 InP 基 HEMT 在受到质子辐照后, 异质结周围产生的缺陷导致漏源饱和电流 ($I_{d,sat}$) 和最大跨导 ($g_{m,max}$) 急剧下降^[18,27,38]。此外, 2022 年, Zhang 等^[27]通过传输线模型 (Transmission Line Method, TLM) 图案表征欧姆接触电阻 (R_c) 和

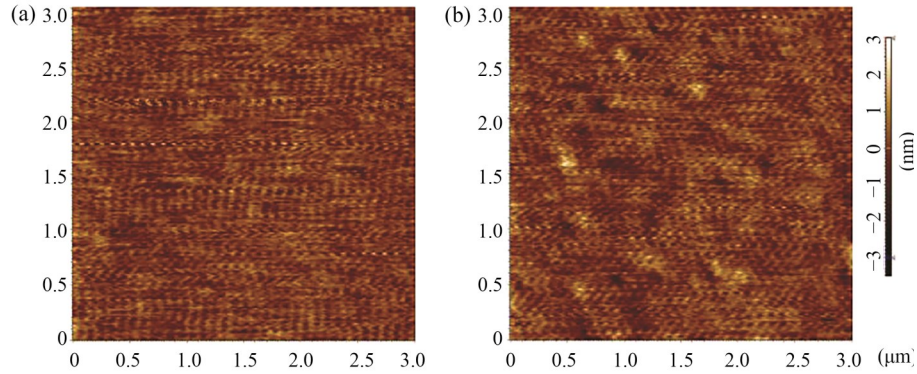


图3 原子力显微镜观测的 InAlAs/InGaAs 异质结构电子辐照前(a)和电子辐照后(b)的表面形貌 (3 μm×3 μm)^[22]

Fig.3 Surface morphology of InAlAs/InGaAs heterostructure measured using AFM (a) Before electron irradiation, (b) After electron irradiation (3 μm×3 μm)^[22]

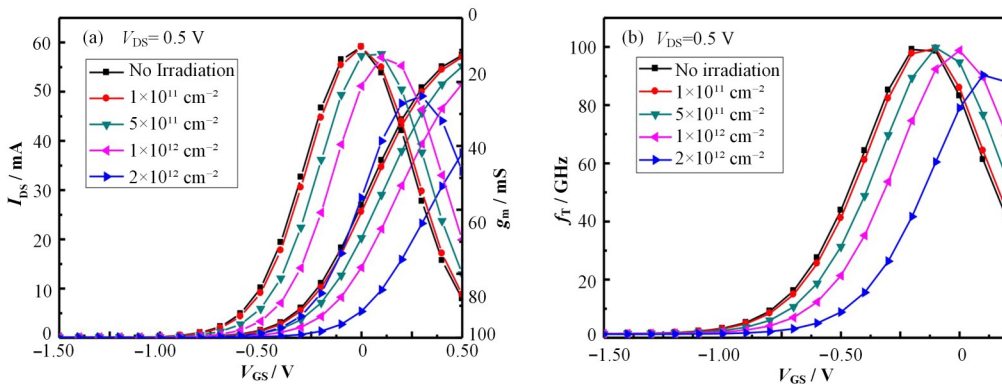


图4 不同质子注量 InP 基 HEMT 的电学特性 (彩图见网络版) (a) 沟道电流, (b) 电流增益截止频率^[18]

Fig.4 Electrical characteristics of InP-based HEMTs with different proton fluences (color online) (a) Channel current, (b) Current gain cutoff frequency^[18]

源极电阻(R_s)在质子辐射前后的变化,结果显示帽层的重掺杂使 R_s 的值在辐照前后保持恒定,但质子辐射在半导体外延层中引入的深能级的俘获和散射效应,导致帽层的 R_s 的值有所升高。

1.3 射频特性影响

InP 基 HEMT 的射频特性主要包含最大电流增益截止频率(f_T)和最高振荡频率(f_{max}),分别决定电

$$f_{max} = \frac{f_T}{\sqrt{4g_d(R_s + R_i + R_G) + 2(C_{GD}/C_{GS})[(C_{GD}/C_{GS}) + g_m(R_s + R_i)]}} \quad (2)$$

式中: g_d 是输出电导; R_G 、 R_s 和 R_i 分别是栅极、源极和沟道电阻; C_{GS} 和 C_{GD} 是栅源电容和栅漏电容。2018年,孙树祥^[18]研究质子对 InP 基 HEMT 的辐照效应,由图 4(b)中所示, f_T 的退化程度随质子辐射的增加而越发严重。根据式(1)、(2)得出 C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{GD}/C_{GS} 是影响器件 f_T 和 f_{max} 的主要因素。2019年,孙树祥^[32]在 InP 基 HEMT 受电子辐照的实验中发现,器件的栅-源和栅-漏区域下引入缺陷电荷,并随着电子辐射注量而增加,进而导致栅-源和栅-漏电阻逐渐增加,降低 f_{max} 的值。此外,他还认为 f_{max} 降低的另外一个重要因素可能是电子辐射降低沟道中载流子浓度引起 R_{on} 的增加。随后在 2020 年,孙树祥等^[22]研究 1 MeV 电子对 InP 基 HEMT 器件的辐照效应,由图 5 可以看出,随着电子注量的增加,器件的 f_T 和 f_{max} 都有所降低,并通过软件 ADS 得到 C_{GS} 和 C_{GD} 的值,结果显示:辐照前后 C_{GD} 和 C_{GD}/C_{GS} 的值变化较大,而 C_{GS} 变化不大,所以 InP 基 HEMT 器件中射频特性的退化主要是由于 C_{GD} 和 C_{GD}/C_{GS} 的增加。

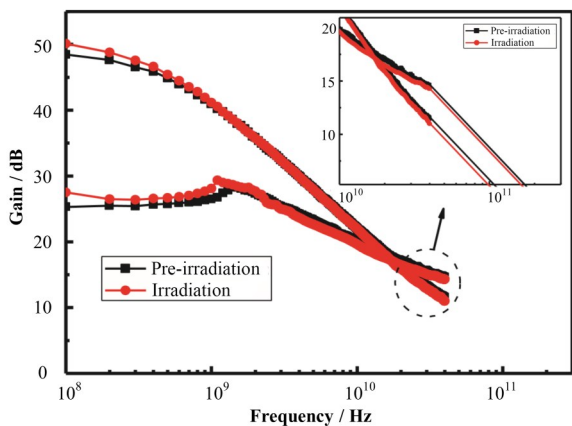


图5 1 MeV 电子辐照前后 InP 基 HEMT 的 f_T 和 f_{max} 值的变化^[22]

Fig.5 Changes of f_T and f_{max} of InP-based HEMTs before and after 1 MeV electron irradiation^[22]

1.4 栅极特性影响

栅极是 HEMT 的重要结构,很大程度上决定着

路最大工作频率和功率传输电路增益大小。通常利用网络分析仪测量辐照前后的射频特性, f_T 和 f_{max} 的值主要利用斜率为-20 dB/十倍斜率的最小二乘拟合,并用电流增益(H_{21})和最大可用/稳定功率增益(MAG/MSG)推出。 f_T 和 f_{max} 由以下公式得出^[22]:

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{GD} + C_{GS})} \quad (1)$$

器件的性能,而且器件的栅极特性会受辐射粒子的影响,引起其他性能的退化,因此对栅极特性的辐照效应的研究有助于深入了解辐射粒子对器件性能的损伤机理。多位学者研究发现,当器件处于反向偏置时,相互接触的界面半导体材料的费米能级低于由辐照产生缺陷能级,缺陷将捕获的电子释放到导带,增加了隧穿电流,导致反向栅电流增加^[39-40]。随后在 2018 年,Gu 等^[35]研究中子辐射对 GaN 基异质结的影响,也发现辐射引起反向偏置栅极漏电流的增加,并导致关断状态栅极漏电流的降低。InP 基 HEMT 中也出现类似的现象,2020 年,孙树祥等^[22]研究 1 MeV 电子辐射对 InP 基 HEMT 性能的影响,在实验中发现电子辐射的影响下,器件的关态栅极漏电流降低、亚阈值摆幅(SS)增加。其中关态栅极漏电流的降低主要受反向栅极漏电流增加的影响,辐照在 InAlAs 阻挡层产生缺陷,增加陷阱辅助隧穿效应,导致栅极漏电流的增加^[41]。另外电子辐射引起器件载流子迁移率降低,导致栅极调制变弱^[42],使器件短沟道效应加剧,最终使亚阈值摆幅增加。同年,孙树祥等又对 InP 基 HEMT 肖特基栅接触受电子辐射的影响进行了研究,由图 6(a)可以看出,反向栅电流随电子注量而增加,这也是由于反向偏置下界面缺陷释放电子所导致的。此外,随着电子注量的增加,器件体材料中诱导的缺陷和接触界面产生的表面态缺陷使沟道载流子浓度和迁移率降低,导致正向栅极电流降低以及栅极接触的串联电阻增加。图 6(b)显示随着电子注量的增加,理想因子 n 值随之增加,肖特基势垒高度 Φ_B 随之减少^[23],这主要是受电子辐照在栅极接触界面上产生的界面态所影响,辐照诱导的界面态增强了通过非理想路径的复合电流,进一步降低了 Φ_B 并提高了 n ^[43]。由此可见,电子辐射会严重影响到 InP 基 HEMT 的栅极特性,因此学者不断研究栅极的制作工艺,以此来改善栅极特性。2021 年,Zhu 等^[44]提出调节 InP 基 HEMT 栅漏间距的新工艺,在实验发现可以通过角度蒸发调整栅极-源极/栅极-漏极间距的方法尽可能

改善 InP 基 HEMT 的性能。栅极工艺的改善提高器件的性能,也能够一定程度上提高器件的抗辐射

能力。

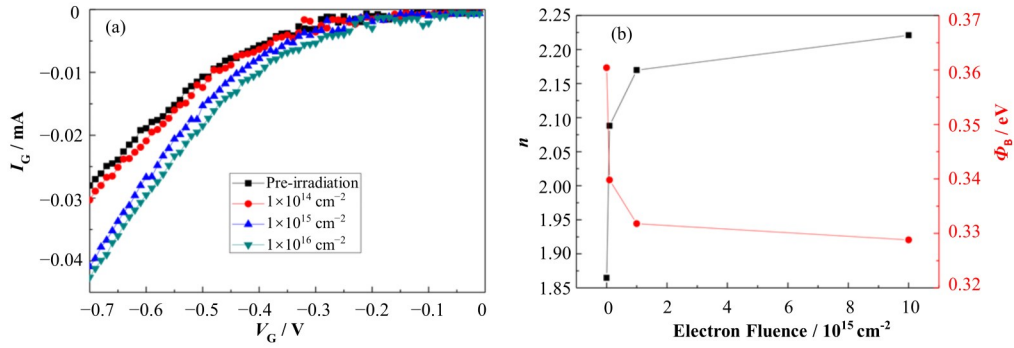


图6 (a) 具有不同电子注量的基于 InP 的 HEMT 的反向 I_G - V_G 特性, (b) 从测量的 I_G - V_G 曲线中提取的 n 和 Φ_B 作为电子注量的函数^[23]

Fig.6 (a) Inverse I_G - V_G characteristics of InP-based HEMTs with different electron fluences, (b) n and Φ_B extracted from the measured I_G - V_G curves as a function of electron fluence^[23]

1.5 Kink 效应影响

Kink 效应是指 HEMT 器件中电流随电压迅速增加的反常现象^[45], 这种反常现象会使器件产生较高的输出电导、噪声会加大以及电压增益会降低等, 众多研究结果显示碰撞电离效应和表面态缺陷是 HEMT 器件产生 kink 效应的主要因素^[46-48]。当 HEMT 器件受到辐照后, 会对原本的 kink 效应造成一定的影响, 2020 年, 孙树祥^[32]就在实验中发现当 InP 基 HEMT 受到电子辐照后, 器件的 kink 效应有所改善, 当辐照注量增加时, 这种改善会更加显著, 这可能是由于电子辐射使栅-源和栅-漏区域的表面态缺陷减少所致^[49]。随后在 2021 年, Meng 等研究电子辐射对 InP 基 HEMT 输出回波损耗 (S_{22}) kink 效应的影响, 实验根据钟英辉在 2018 年提出的一种 16 参数的小信号拓扑结构(这种结构可以提高 S_{22} 参数拟合精度^[50]), 在此基础上设计小信号器件模型的双反馈电路, 并对 S_{22} 参数 kink 效应进行分析。由图 7 中可以看出, S_{22} 参数 kink 效应随着电子注量的增加变得更加严重, 在实验中发现低频和高频下不同等效形式的输出阻抗之间不连续性是造成 S_{22} kink 效应的主要原因, 并通过分析得出 g_m 、 C_{GS} 、 C_{GD} 是影响 kink 效应的主要因素, 其中栅极电容 ($C_g = C_{GS} + C_{GD}$), 随着电子辐射注量的增加, g_m 降低增强了 S_{22} 的 kink 效应, C_{GS} 降低和 C_{GD} 增加缓解 S_{22} 的 kink 效应, 但由于 g_m 的降低更加明显, 对 kink 效应的影响更大, 所以导致 S_{22} 的 kink 效应随辐射注量的增加更加严重^[51]。2022 年, Zhang 等^[52]通过实验研究 2 MeV 质子辐射对 InP 基 HEMT 的影响, InP 基 HEMTs 的 kink 效应通过栅极凹槽钝化得到改善, 但是在实验中发现, 辐照后, 器件再次出现 kink 效应, 这主要是因为

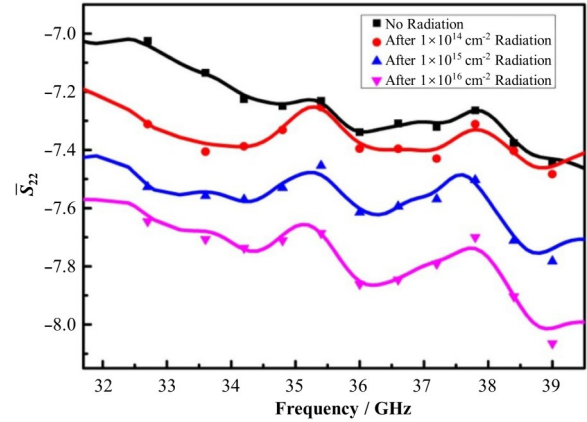


图7 不同电子辐射注量下电子辐射前后 InP 基 HEMT 的 S_{22} ^[51]

Fig.7 S_{22} of InP-based HEMTs before and after electron irradiation under different electron fluences^[51]

质子轰击和级联碰撞导致栅极凹槽上引入新的表面态缺陷^[27]。

因此缓解 kink 效应也是在 InP 基 HEMT 器件的辐照效应研究中重要的环节, 多位学者发现减小侧凹槽间距并使用 InP 蚀停止层可以有效消除 kink 效应^[53-56]; 此外在 2020 年, Cha 等^[57]发现在 InP 基 HEMT 结构中同时使用 InP 蚀刻停止层和 Pt 栅极金属可以使器件保持低栅极漏电流; 同年, Tong 等^[58]在实验中发现 InP 基 HEMT 可以通过紫外线/臭氧 (UV/Ozone) 和四甲基氢氧化铵 (TMAH) 表面处理来减少表面缺陷; 这几项技术能够很好地抑制 kink 效应并使器件表现出优异的直流 (Direct Current, DC)、射频 (Radio Frequency, RF) 和噪声性能, 未来可以进一步研究这些技术对 InP 基 HEMT 器件辐照效应的影响。

1.6 跨导“峰值崩溃”效应

跨导是衡量栅对源漏电流的调制能力,也是影响 HEMT 性能的重要因素。而 InP 基 HEMT 与其他 III-V 族 HEMT 由于基底以及材料不同,所以在性能方面也会有所差别,在受到辐照后会出现与其他 HEMT 器件不同的现象。早在 2001 年, Jackson 等^[59]在 InP 基 HEMT 对 3 MeV He⁺ 离子辐射耐受性的实验中,发现漏极电流会在一定区域内产生塌陷。2022 年,张佳林等^[27]在 2 MeV 质子辐照效应实验中发现类似且更严重的跨导“峰值崩溃”现象。一般情况下,器件的跨导会对栅极电压产生依赖性,但在实验中 InP 基 HEMT 跨导对栅极电压的依赖性在达到一定辐照剂量后出现明显的分段现象,如图 8(a),当辐射注量为 $1 \times 10^{14} \text{ H}^+ \text{ cm}^{-2}$ 时,在较低栅极电压区域,

跨导斜率变陡,接着栅极电压增大后,跨导出现剧烈的峰值塌陷现象,在栅极电压为正时,跨导恢复正常。根据辐照对 InP 基 HEMT 器件缺陷研究,辐照产生的缺陷主要分布在沟道的上下异质结界面和栅极凹槽的表面,如图 8(b)和(c)所示。当 $V_{GS} < V_{th}$ 时,沟道附近界面陷阱的缺陷能级非常接近准费米能级,它们很容易俘获电子而带负电。因此,当沟道载流子耗尽时,器件的阈值电压会向前移动。此外,由于缺陷能级离势垒层的准费米能级较远,在这种情况下栅-凹槽界面的陷阱还没有被激活。随着栅极电压的增加,栅极凹槽表面的准费米能级逐渐接近导带。因此,栅极凹槽界面的陷阱会捕获电子并带负电,充当“虚拟栅极”来耗尽沟道载流子,从而导致跨导峰值崩塌。

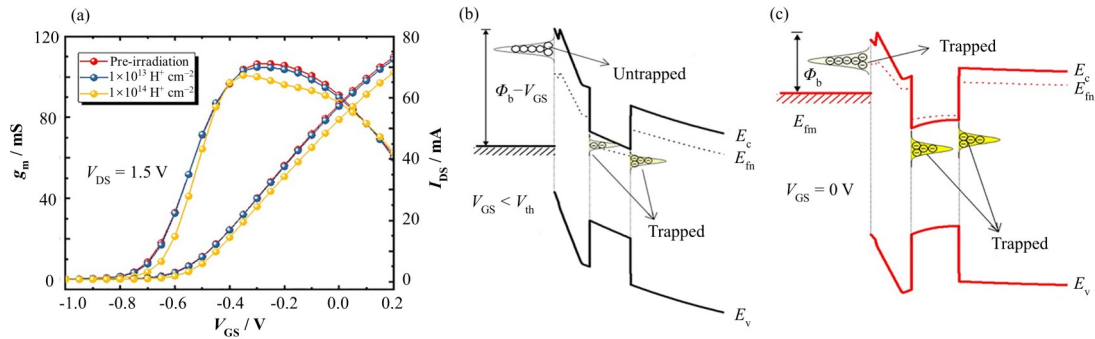


图8 InP基HEMT的跨导“峰值崩溃”效应(彩图见网络版)

(a) 转移特性, (b) 夹断栅极电压, (c) 零栅极电压辐照产生的缺陷分布^[27]

Fig.8 The "peak collapse" effect of transconductance of InP-based HEMT (color online)

(a) Transfer characteristics, (b) Pinch-off gate voltage, (c) Defect distribution generated by irradiation with zero gate voltage^[27]

2 抗辐射加固措施研究进展

InP 基 HEMT 在受到高能粒子辐照后会诱生缺陷,缺陷会影响沟道载流子浓度和迁移率,从而影响器件性能的退化,严重时会出现器件失效的现象,因此 InP 基 HEMT 的抗辐射加固研究对提高空间通信系统运行可靠性具有重要意义。根据以上辐射粒子对 InP 基 HEMT 性能的影响,抗辐射加固的研究主要从器件的结构设计和制作工艺上着手,以下就是目前 InP 基 HEMT 抗辐射加固的主要研究进展。

2.1 采用复合沟道结构加固

沟道的高度可以限制沟道内载流子的降低,同时也可以缓解由诱生缺陷所带来的散射效应,最终达到提高沟道载流子迁移率的目的。早在 2006 年,李潇等^[60]提出以 InGaAs/InP 作为 InP 基 HEMT 沟道层的小信号物理模型,这种复合沟道结构充分利用低场时 InGaAs 的高电子迁移率特性以及高电场时 InP 的高阈值能量和高饱和速率,在保证优良的毫米

波频率特性的前提下,又提高了 HEMT 的漏极-源极击穿电压。2020 年,常明铭^[61]在李潇提出复合沟道的基础上对复合沟道的结构进行改良,复合沟道结构的厚度与常规沟道层的厚度保持一致,将其分为三层,3 nm 厚度的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (InGaAs)、2 nm 厚度的 InAs 和 10 nm 厚度的 $\text{In}_{0.53}(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.47}\text{As}$ (AlInGaAs),并对其进行辐照的仿真实验,结果表明:复合沟道的输出特性、跨导特性、沟道内电子浓度以及沟道中电子迁移率的退化程度与常规沟道结构的退化程度相比,有明显的下降。随后,张佳佳等^[62]继续对常明铭的复合沟道进行改良,将 AlInGaAs 的组分改为 $\text{In}_{0.53}(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})_{0.47}\text{As}$,图 9 显示单沟道和复合沟道中二维电子气面密度(n_s)和迁移率(μ)随辐射注量的影响,结果表明:随着辐射注量的增加,复合沟道中的 n_s 和 μ 的退化程度要比单沟道要低,复合沟道削弱载流子的去除效应,并通过增加载流子数量和降低缺陷捕获率的方法提高 InP 基 HEMT 的抗辐射能力。2022 年, Bhattacharya 等^[63]在

Lg(栅长)=19 nm 异质结的基础上,将 $\text{Ga}_{0.15}\text{In}_{0.85}\text{As}$ /InAs/ $\text{Ga}_{0.15}\text{In}_{0.85}\text{As}$ 作为 InP 基 HEMT 的复合沟道,研究 InP/ SiO_2 界面上固定负电荷(Q_f)对异质结晶体管特性的影响,结果表明:InP 和 SiO_2 之间有更好的界面质量,能够提高硅片上异质结 InP 基 HEMT 的 RF/

DC 特性。虽然 Bhattacharya 等只研究 InP 基 HEMT 器件采用新复合沟道情况下对器件性能的影响,但这可以为 InP 基 HEMT 器件的抗辐射加固研究提供一定的理论依据。

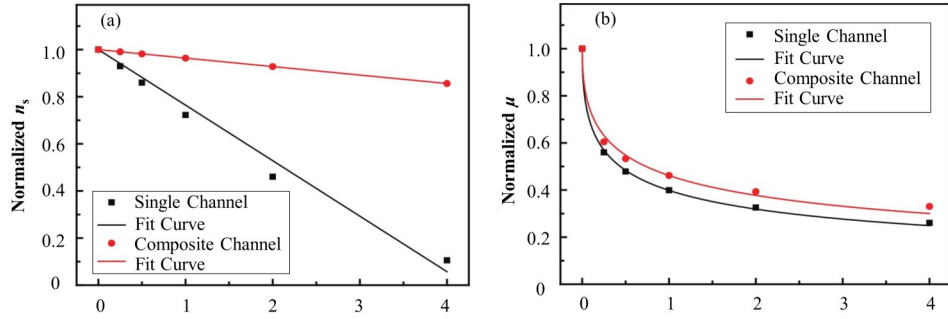


Fig.9 单沟道和复合沟道的归一化 n_s (a)和归一化 μ (b)随着质子注量而变化^[62]
Variations of normalized n_s (a) and normalized μ (b) with proton fluence for single and composite channels^[62]

2.2 改变掺杂浓度和掺杂方式加固

2015年,周书星等^[64]在实验中发现最佳 Si- δ 掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$,可以显著改善 InP 基 HEMT 的电学特性。随后在 2018 年,李金伦^[65]通过霍尔测量比较体掺杂和 δ 掺杂(δ 掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)对 2DEG 特性的影响时发现,当 δ 掺杂和体掺杂在同样的条件下, δ 掺杂的载流子密度要比体掺杂的载流子密度要高得多。之前主要是研究掺杂对器件性能的影响,为 InP 基 HEMT 的抗辐射加固的研究提供理论基础。2020 年,钟英辉等^[66]提出如图 10(b)中双 Si 掺杂平面(沟道双侧掺杂)优化 InP 基 HEMT 的抗辐射结构,通过软件仿真模拟器件在辐照条件下的性能影响,结果显示:沟道层下额外的 Si 掺杂平面极大地提高 InP 基 HEMT 的沟道电流、跨导、电流增益截止频率和最大振荡频率。并且由图 10(c)可以看出,在质子辐射下,双 Si 掺杂结构器件的性能退化程度要明显低于单 Si 掺杂结构。InP 基

HEMT 通过插入另一个掺杂平面增加载流子数量,削弱缺陷引起的载流子去除效应,增强器件的质子抗辐射能力。同年,常明铭^[61]也提出另外一种双 Si 掺杂层的结构,在原单掺杂层上方再引入一个 Si 面掺杂层,并用 InAlAs 隔离层将两层掺杂层隔开,并通过 Sentaurus TCAD 对其进行辐照仿真测试,结果表明:这种沟道上双掺杂层的结构与沟道双侧掺杂层的结构类似,都能明显地提高 InP 基 HEMT 器件抗质子辐射的能力。另外,隔离层的厚度也会影响到器件的抗辐射能力。在李金伦的实验中发现当隔离层较薄时,远程电离杂质散射较弱,使得载流子迁移率增大^[65]。随后在 2022 年,周书星等^[67]在实验中发现,当 InP 基 HEMT 中有高浓度的 δ 掺杂和较薄的隔离层的器件结构时,受到辐照后,器件的 2DEG 浓度和载流子迁移率的退化程度有所减弱,提高了 InP 基 HEMT 的抗辐射能力。同年,Chen 等^[68]对在 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ /InP 复合沟道的 InP 基 HEMT 的研究中

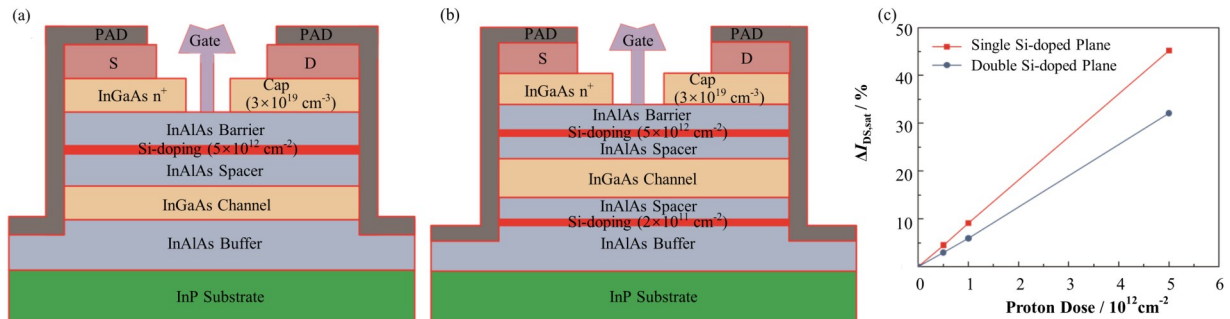


图 10 (a) InP 基 HEMT 常规结构, (b) InP 基 HEMT 双 Si 掺杂结构, (c) 常规结构和双 Si 掺杂结构 InP 基 HEMT 沟道电流退化曲线^[66]

Fig.10 (a) Conventional structure of InP-based HEMT, (b) Double Si-doped structure of InP-based HEMT, (c) Current degradation curves of InP-based HEMT channel of conventional structure and double Si-doped structure^[66]

发现,减少 InP 掺杂的子沟道厚度可以提高器件的击穿电压。但还未在此基础上研究粒子辐射对该器件的影响,未来可以在这个方向上做更深一步的研究。

2.3 改变 In 组分含量加固

陈翔等^[69]研究 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 势垒层中不同 Al 组分对于 HEMT 性能的影响,研究表明,在一定的 Al 组分范围内,2DEG 浓度和迁移率随着 Al 组分的升高而增大。2018 年,张子砚等^[70]也是通过研究发现 AlGaIn 势垒层中 Al 组分影响 HEMT 器件中的 2DEG 浓度。对 InP 基 HEMT 而言,沟道中 In 的组分的含量同样会影响到器件的性能,早在 2003 年,仇志军等^[71]就对缓冲层高迁移率晶体管(MM HEMT)的 In 组分沟道进行研究,结果表明:当沟道中 In 组分提高到 0.65 时,沟道中有效带隙变小,使电子的有效质量变小,载流子迁移率得到提升,并且 In 组分含量的提高使电子合金无规序散射减少,这也有利于载流子迁移率的提升;但是当 In 组分过高时,就会造成晶格失配。2018 年,李金伦^[65]利用霍尔测量研究

In 含量对于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 异质结 2DEG 特性的影响时,In 组分设置为 0.65、0.70、0.75、0.80,在一定的实验条件下,InP 基 HEMT 中的载流子迁移率和载流子浓度是随着 In 组分的增加而增加,这是由于高 In 含量削弱合金中 2DEG 的无序散射^[72],以及较高的势垒高度导致的结果,但是,In 含量的值较高时不利于异质结的匹配,带隙会直接跃迁为间接跃迁,这会影响到载流子的迁移率^[65]。2021 年, Ajayan 等^[73]提出增加 InGaAs 沟道中 In 的含量有利于提高 InP 基 HEMT 的跨导,但同样会增加 kink 效应,最终导致栅极下电场强度增加、输出电导增加以及击穿电压降低。2022 年,周书星等^[67]研究不同 In 组分抗辐射能力的影响,设置了 In 组分为 0.6、0.65、0.7 和 0.75,在图 11 中显示,当沟道 In 组分较低时, InP 基 HEMT 在辐照环境下对 2DEG 的损伤程度较小,这是因为 InP 基 HEMT 器件中 In 组分较大时,在受到辐照过后产生的应变弛豫导致二维电子气载流子浓度降低。但目前有关 In 组分对于 HEMT 抗辐射能力的研究相对较少,所以在未来的工作当中,还可以在这方面进行更深一步的研究。

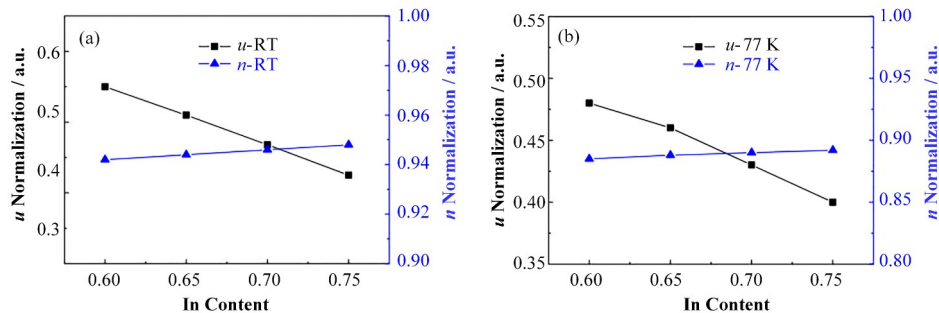


图 11 不同温度下电子辐照对不同 InGaAs 沟道 In 组分 InP HEMT 二维电子气浓度和电子迁移率的归一化影响 (a) 室温, (b) 77 K^[67]

Fig.11 Normalized effects of electron irradiation on the 2D electron gas concentration and electron mobility of InP HEMTs with different InGaAs channel in compositions under different temperature (a) Room temperature, (b) 77 K temperature^[67]

2.4 表面钝化材料加固

对 InP 基 HEMT 进行表面钝化时,寄生电容会增加,从而影响器件的各项性能。2018 年,Asif 等^[74]通过超薄 15 nm 原子层沉积氧化铝 (ALD- Al_2O_3) 改进 InAlAs/InGaAs InP 基 HEMT 的表面钝化,这样可以提高 InP 基 HEMT 器件在 DC 和 RF 方面的性能。2019 年, Ajayan 等^[75]在实验中发现可以通过改善 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合电解质钝化层的表面质量,使寄生电容达到最小化。另外早在 2017 年,王海丽^[76]对多种表面钝化的材料进行研究,从多方面进行分析对比,最终提出苯并环乙烯 (BCB) 作为 InP 基 HEMT 的钝化材料,可以提高器件的抗辐射能力,由于多种条件的限制,并未对此想法进行实验。但在 2019

年,钟英辉等^[77]研究出基于 BCB 钝化的抗质子辐射 InP 基 HEMT 器件加工方法,此发明专利有效地提高了 InP 基 HEMT 器件抗质子辐射能力。随后 2020 年,钟英辉等^[78]又提出在 InP 基 HEMT 将表面覆盖 $\text{AlN}/\text{Si}_3\text{N}_4$ 堆叠结构和 BCB 桥作为器件钝化层的专利,不仅提升了 HEMT 器件的抗质子辐射能力,还减少了辐射对其各项性能的影响。2021 年,杨傅等^[79]根据王海丽提出的 BCB 表面钝化的想法对其进行仿真实验,利用 Geant4 软件搭建基于苯并环乙烯 (BCB) 钝化的 InP 基 HEMT 辐射加固结构模型,并且用 Sentaurus TCAD 缺陷模型仿真不同注量质子辐射下器件的 DC 和 RF 特性变化,发现随着质子辐射剂量增加,加固前后器件的 DC 特性都有所退

化,但是具有加固结构的器件在受到辐照过后 $I_{DS,sat}$ 、 g_{max} 、 f_T 、 f_{max} 等特性的退化程度要比加固前器件要小。所以采用 BCB 表面钝化的加固方法可以更好地增强 InP 基 HEMT 的辐射耐受性。但是这只是利用软件模拟器件的抗辐射加固研究,后续还需要对其做进一步的辐照实验,以此验证 BCB 表面钝化工艺技术对 InP 基 HEMT 的抗辐射加固效果。

2.5 其他加固方式

对于 InP 基 HEMT 的抗辐射加固研究除了从复合沟道、Si- δ 掺杂、In 组分和 BCB 钝化等方面着手,还可以从其他方面进行研究^[80-82]。HEMT 器件在制作过程中会经过热退火的过程,因此热退火的温度和时间也会影响到器件的性能,甚至会影响器件的辐照损伤效应。1998 年,Ohyaama 等^[83]在实验中发现 InGaP/InGaAs 假晶 HEMT 的热退火行为对其辐照效应的影响以及器件的恢复行为。InP 基 HEMT 器件在受到辐照后,产生的缺陷会增加载流子的扩散,导致迁移率的下降,但器件受到辐照后再经过高温退火,原子振动的增强使空间和间隙原子更容易扩散到器件的边界和界面,其中一部分会重新组合,从而使得部分载流子浓度得到恢复^[84],并且晶格也会被重新排列^[85-86],所以晶格的周期性势场在退火后恢复,进而降低器件的库伦散射,器件的载流子迁移率恢复到辐照前的水平。因此在 2022 年,Zhao 等^[10]研究热退火对 InP 基 HEMT 质子辐照效应的影响,结果表明:当退火温度为 100 °C 和 200 °C、退火时间为 10 min 和 5 min 时,InP 基 HEMT 的 DC 特性可以部分恢复。器件在合适条件进行热退火后,增强了原子的振动,复合降低了缺陷浓度,晶格重排减弱了散射,从而使载流子迁移率和浓度得到部分恢复,提高器件的抗辐射能力。此外,沟道层的厚度也会决定 HEMT 器件的性能。2022 年,周书星等^[67]在研究中发现,当沟道层厚度较高时,辐照对 HEMT 的二维电子气迁移率的损伤程度相对较小,因为沟道层越薄,量子阱内产生的缺陷就越多,对二维电子气迁移率损伤就越大。由于 InP 基 HEMT 的性能受很多因素所影响,并且辐照对于器件也是有很大的影响,所以对器件的抗辐射加固的研究可以综合多个方面的因素进行研究。

3 总结与展望

近些年来,InP 基 HEMT 因其本身优异的性能被应用于空间通信系统中,但空间环境中所包含的各种辐射粒子会影响空间通信系统中电子设备的正常使用。众多研究结果表明,InP 基 HEMT 受到各

种粒子的辐照后,在器件结构内会产生多种缺陷,影响沟道中载流子浓度和迁移率,使器件的输出特性、跨导特性、射频特性等受到不同程度的退化。此外,多位学者根据 HEMT 性能退化的机理,从器件的结构设计和制作工艺上对 InP 基 HEMT 进行抗辐射加固,其中结构设计上主要是对器件复合沟道结构、沟道 In 组分含量、隔离层厚度的调整,在器件的制作工艺上主要包含钝化材料的选择、热退火的时间和温度的控制以及掺杂浓度和掺杂方式的选择。这些加固方法都不同程度地增强 InP 基 HEMT 抗辐射的能力,提高空间通信系统的可靠性。

InP 基 HEMT 的抗辐射加固研究一直是半导体领域内的研究热点,对促进磷化铟射频电路在空间通信领域内的应用具有重大的意义。要想进一步提高该器件的空间可靠性,还需要对其做更深入的研究,未来对 InP 基 HEMT 的抗辐射加固研究还可以从以下方面开展:(1)在目前 InP 基 HEMT 辐照效应的研究中,有的是通过软件模拟辐射的仿真实验,但器件在实际的辐照环境下,可能会遇到一些不确定的因素,因此,需要通过实验对器件的抗辐射加固方法进行佐证;(2)目前学者提出多种复合沟道的结构,使器件的性能有很大提高,但对部分复合沟道结构没有进行辐照效应方面的研究,未来可以在这些复合沟道的基础上,研究其抗辐射的能力;(3)对 InP 基 HEMT 制作钝化层时,可以尝试其他的高分子有机材料进行制作,也可以将几种常用的加固材料进行结合,共同作为器件的钝化层,优化抗辐射特性。

作者贡献声明 方仁凤负责搜集参考文献,论文起草;周书星负责提出编写思路和修改的主要工作;曹文或负责修改检查论文;魏彦锋负责参考文献中部分数据的分析;汪竞阳负责审核、把关论文的科学性、严谨性;李树森负责指导修改论文部分内容;颜家圣负责审核、把关论文的科学性、严谨性;梁桂杰负责审核、把关论文的科学性、严谨性。

参考文献

- 1 Sengupta K, Nagatsuma T, Mittleman M D. Terahertz integrated electronic and hybrid electronic-photonics systems[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(12): 622 – 635. DOI: 10.1038/s41928-018-0173-2.
- 2 Mei X B, Yoshida W, Lange M, *et al.* First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(4): 327 – 329. DOI: 10.1109/led.2015.2407193.
- 3 Zhao C, Xu B, Wang Z J, *et al.* Boron-doped III – V

- semiconductors for Si-based optoelectronic devices[J]. Journal of Semiconductors, 2020, **41**: 011301. DOI: 10.1088/1674-4926/41/1/011301.
- 4 Ajayan J, Nirmal D. A review of InP/InAlAs/InGaAs based transistors for high frequency applications[J]. Superlattices and Microstructures, 2015, **86**: 1–19. DOI: 10.1016/j.spmi.2015.06.048.
 - 5 Deal W R, Leong K, Zamora A, *et al.* A Low-Power 670-GHz InP HEMT receiver[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2016, **6**(6): 862–864. DOI: 10.1109/tthz.2016.2614264.
 - 6 Leong K.M K H, Mei X B, Yoshida W, *et al.* A 0.85 THz low noise amplifier using InP HEMT transistors[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, **25** (6): 397–399. DOI: 10.1109/lmwc.2015.2421336.
 - 7 Schlee H, Alestig G, Halonen J, *et al.* Ultralow-Power Cryogenic InP HEMT with minimum noise temperature of 1 K at 6 GHz[J]. IEEE Electron Device Letters, 2012, **33**(5): 664–666. DOI: 10.1109/led.2012.2187422.
 - 8 Li J, Bergsten J, Pourkabirian A, *et al.* Investigation of noise properties in the InP HEMT for LNAs in qubit amplification: effects from channel indium content[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2024, **12**: 243–248. DOI: 10.1109/JEDS.2024.3371905.
 - 9 Lyu Y, Li Z, Zhang A, *et al.* An improved method for InP HEMT noise-parameter determination based on 50- Ω noise measurements[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2024, **12**: 113 – 120. DOI: 10.1109/JEDS.2024.3360461.
 - 10 Zhao X Q, Mei B, Ding P, *et al.* Thermal annealing behavior of InP-based HEMT damaged by proton irradiation[J]. Solid-State Electronics, 2022, **193**: 108287. DOI: 10.1016/j.sse.2022.108287.
 - 11 Leong K M K H, Mei X B, Yoshida H W, *et al.* 850 GHz receiver and transmitter front-ends using InP HEMT[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, **7**(4): 466–475. DOI: 10.1109/tthz.2017.2710632.
 - 12 Zhong Y H, Li K K, Li X J, *et al.* A W-band high-gain and low-noise amplifier MMIC using InP-based HEMTs[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2015, **34**(6): 668 – 672. DOI: 10.11972/j. issn. 1001-9014. 2015.06.006.
 - 13 Takahashi T, Kawano Y, Makiyama K, *et al.* Maximum frequency of oscillation of 1.3 THz obtained by using an extended drain-side recess structure in 75-nm-gate InAlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors[J]. Applied Physics Express, 2017, **10**(2): 024102. DOI: 10.7567/apex.10.024102.
 - 14 Chen J, Zhang E X, Zhang C X, *et al.* RF Performance of Proton-Irradiated AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, **61**(6): 2959 – 2964. DOI: 10.1109/tns.2014.2362872.
 - 15 Sasaki H, Hisaka T, Kadoiwa K, *et al.* Ultra-high voltage electron microscopy investigation of irradiation induced displacement defects on AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Microelectronics Reliability, 2018, **81**: 312 – 319. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.10.005.
 - 16 Petitdidier S, Guhel Y, L. Trolet J, *et al.* Neutron irradiation effects on the electrical properties of previously electrically stressed AlInN/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, **66**(5): 810–819. DOI: 10.1109/tns.2019.2908055.
 - 17 Sun S X, Chang M M, Li M K, *et al.* Effect of defects properties on InP-based high electron mobility transistors [J]. Chinese Physics B, 2019, **28**(7): 078501. DOI: 10.1088/1674-1056/28/7/078501.
 - 18 Sun S X, Chang M M, Zhang C, *et al.* Proton irradiation effect on InP-Based high electron mobility transistor by numerical simulation with non-uniform induced acceptor-like defects[J]. Physica Status Solidi (RRL) -Rapid Research Letters, 2018, **12**(6): 1800027. DOI: 10.1002/pssr.201800027.
 - 19 Sun S X, Ji H F, Yao H J, *et al.* Physical modeling of direct current and radio frequency characteristics for InP-based InAlAs/InGaAs HEMTs[J]. Chinese Physics B, 2016, **25**(10): 108501. DOI: 10.1088/1674-1056/25/10/108501.
 - 20 孙树祥. InP基HEMT质子和电子辐照效应研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
 - 21 SUN Shuxiang. Research on the proton and electron irradiation effects of InP-based HEMTs[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
 - 21 王海丽, 吉慧芳, 孙树祥, 等. InAlAs/InGaAs/InAlAs量子阱质子辐照损伤机理[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, **44**(4): 151 – 155+161. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-2400.2017.04.026.
 - 22 WANG Haili, JI Huifang, SUN Shuxiang, *et al.* Proton irradiation damage mechanism of InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum well[J]. Journal of Xidian University, 2017, **44**(4): 151 – 155+161. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-2400.2017.04.026.

- mechanisms of InP-based high-electron-mobility transistors under 1 MeV electron irradiation[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, **53**(17): 175107. DOI: 10.1088/1361-6463/ab6cd0.
- 23 Sun S X, Liu H H, Yang B, *et al.* Effect of 1 MeV electron irradiation on gate contact characteristics of InP-based HEMTs[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, **114**(1): 105084. DOI: 10.1016/j.mssp.2020.105084.
- 24 郭伟玲, 陈艳芳, 李松宇, 等. GaN 基 HEMT 器件的缺陷研究综述[J]. *发光学报*, 2017, **38**(6): 760–767. DOI: 10.3788/fgxb20173806.0760.
- GUO Weiling, CHEN Yanfang, LI Songyu, *et al.* Reviews on trapping of GaN-based HEMTs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, **38**(6): 760 – 767. DOI: 10.3788/fgxb20173806.0760.
- 25 Ohyama H, Simoen E, Kuroda S, *et al.* Degradation and recovery of AlGaAs/GaAs p-HEMT irradiated by high-energy particle[J]. *Microelectronics Reliability*, 2001, **40**(1): 79–85. DOI: 10.1016/s0026-2714(00)00073-1.
- 26 Liu L, Wang Y H, Xi Y Y, *et al.* Study on the effects of proton irradiation on the dc characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with source field plate [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2014, **32**(2): 022202. DOI: 10.1116/1.4866401.
- 27 Zhang J L, Ding P, Mei B, *et al.* The effects and mechanisms of 2 MeV proton irradiation on InP-based high electron mobility transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, **120**(10): 103501. DOI: 10.1063/5.0084257.
- 28 姜明. 半导体电子材料的辐照效应研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- JIANG Ming. Research on the irradiation effect of semiconductor electronic materials[D]. Chendu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- 29 Sun S X, Ma L H, Cheng C, *et al.* Numerical simulation of the impact of surface traps on the performance of InP-based high electron mobility transistors[J]. *Physica Status Solidi (A) - Applications and Materials Science*, 2017, **214**(10): 1700322. DOI: 10.1002/pssa.201700322.
- 30 Bongim J, Subramanian S. Carrier-removal rate and mobility degradation in heterojunction field-effect transistor structures[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, **49**(6): 3222 – 3229. DOI: 10.1109/tns.2002.805424.
- 31 Anderson J T, Koehler D A, Greenlee D J, *et al.* Substrate-dependent effects on the response of AlGaIn/GaN HEMTs to 2-MeV proton irradiation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, **35**(8): 826 – 828. DOI: 10.1109/led.2014.2331001.
- 32 Sun S X, Ding P, Jin Z, *et al.* Effect of electron irradiation fluence on InP-based high electron mobility transistors[J]. *Nanomaterials (Basel)*, 2019, **9**(7): 967. DOI: 10.3390/nano9070967.
- 33 In Hak L, Chul L, Byoung Ki C, *et al.* Proton-induced conductivity enhancement in AlGaIn/GaN HEMT devices [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2018, **72**(8): 920–924. DOI: 10.3938/jkps.72.920.
- 34 Hu X W, Karmarkar P A, Jun B, *et al.* Proton-irradiation effects on AlGaIn/AlN/GaN high electron mobility transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, **50**(6): 1791–1796. DOI: 10.1109/tns.2003.820792.
- 35 Gu W P, Xu X B, Zhang L, *et al.* Study on neutron irradiation-induced structural defects of GaN-Based heterostructures[J]. *Crystals*, 2018, **8**(5): 198. DOI: 10.3390/cryst8050198.
- 36 Zhou S X, Fang R F, Chen C L, *et al.* Effects of electron irradiation at different energy and fluences on electrical properties of InP HEMT structure[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2021, **55**(12): 2274–2281. DOI: 10.7538/yzk.2021.youxian.0483.
- 37 Kalavagunta A, Touboul A, Shen L, *et al.* Electrostatic mechanisms responsible for device degradation in proton irradiated AlGaIn/AlN/GaN HEMTs[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(4): 2106 – 2112. DOI: 10.1109/tns.2008.2001705.
- 38 Sun S X, Wei Z C, Xia H P, *et al.* Effects of proton irradiation at different incident angles on InAlAs/InGaAs InP-based HEMTs[J]. *Chinese Physics B*, 2018, **27**(2): 028502. DOI: 10.1088/1674-1056/27/2/028502.
- 39 Akbay A, Korkut H, Ejderha K, *et al.* Responses of Pt/n-InP Schottky diode to electron irradiation in different temperature conditions[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2011, **289**(1): 145–148. DOI: 10.1007/s10967-011-1041-y.
- 40 Baranwal V, Kumar S, C. Pandey, *et al.* Effect of ion irradiation on current – voltage characteristics of Au/n-GaN Schottky diodes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, **480**(2): 962 – 965. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.02.094.
- 41 Lo C F, Liu L, Ren F, *et al.* Proton irradiation energy dependence of DC and RF characteristics on InAlN/GaN

- high electron mobility transistors[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2012, **30**(4): 041206. DOI: 10.1116/1.4729285.
- 42 Lei Z F, Guo H X, Tang M H, *et al.* Degradation mechanisms of AlGaIn/GaN HEMTs under 800 MeV Bi ions irradiation[J]. Microelectronics Reliability, 2018, **80**: 312–316. DOI: 10.1016/j.microrel.2017.07.086.
- 43 Chatterjee A K, Khamari S, Porwal S, *et al.* Effect of ^{60}Co γ -irradiation on the nature of electronic transport in heavily doped n-type GaN based Schottky photodetectors [J]. Journal of Applied Physics, 2018, **123**(16): 161585. DOI: 10.1063/1.5013102.
- 44 Zhu M S, Xie Y Y, Deng J N, *et al.* A novel process for adjusting the gate-drain spacing in InP-HEMTs with[J]. Microelectronic Engineering, 2021, **247**: 111596. DOI: 10.1016/j.mee.2021.111596.
- 45 朱培敏, 陈雷雷, 金宁, 等. 氮化镓基高电子迁移率晶体管 kink 效应研究[J]. 微电子学, 2019, **49**(6): 858–861+867. DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.190032.
ZHU Peimin, CHEN Leilei, JIN Ning, *et al.* Study on kink effect in GaN-based high electron mobility transistor [J]. Microelectronics, 2019, **49**(6): 858–861+867. DOI: 10.13911/j.cnki.1004-3365.190032.
- 46 Zhong Y H, Wang X T, Su Y B, *et al.* Impact of the lateral width of the gate recess on the DC and RF characteristics of InAlAs/InGaAs HEMTs[J]. Journal of Semiconductors, 2012, **33**(5): 054007. DOI: 10.1088/1674-4926/33/5/054007.
- 47 Vasallo B G, Mateos J, Pardo D, *et al.* Monte Carlo study of kink effect in short-channel InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors[J]. Journal of Applied Physics, 2003, **94**(6): 4096 – 4101. DOI: 10.1063/1.1603955.
- 48 Suemitsu T, Enoki T, Sano N, *et al.* An analysis of the kink phenomena in InAlAs/InGaAs HEMT's using two-dimensional device simulation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1998, **45**(12): 2390 – 2399. DOI: 10.1109/16.735714.
- 49 Oh S K, Song C G, Jang T, *et al.* Reduction of gate leakage current on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors by electron-beam irradiation[J]. Journal of Nanosci Nanotechnol, 2013, **13**(3): 1738 – 1740. DOI: 10.1166/jnn.2013.6987.
- 50 Zhong Y H, Li K K, Li M K, *et al.* An improved 16-element small-signal model for InP-based HEMTs[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2018, **37**(2): 163 – 167. DOI: 10.11972/j. issn. 1001-9014.2018.02.006.
- 51 Meng S H, Sun S X, Ding P, *et al.* Electron radiation impact on the kink effect in S_{22} of InP-based high electron mobility transistors[J]. Semiconductor Science and Technology, 2021, **36**(9): 095029. DOI: 10.1088/1361-6641/ac0e76.
- 52 Ding P, Chen C, Ding W C, *et al.* Ultra-thin 20 nm-PECVD- Si_3N_4 surface passivation in T-shaped gate InAlAs/InGaAs InP-based HEMTs and its impact on DC and RF performance[J]. Solid-State Electronics, 2016, **123**: 1–5. DOI: 10.1016/j.sse.2016.05.011.
- 53 Ajayan J, Nirmal D, Ravichandran T, *et al.* InP high electron mobility transistors for submillimetre wave and terahertz frequency applications: A review[J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2018, **94**: 199–214. DOI: 10.1016/j.aue.2018.07.015.
- 54 Zhong Y H, Wang X T, Su Y B, *et al.* An 88 nm gate-length $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ InP-based HEMT with f_{max} of 201 GHz[J]. Journal of Semiconductors, 2012, **33**: 074004. DOI: 10.1088/1674-4926/33/7/074004.
- 55 Meneghesso G, Zanoni E. Failure modes and mechanisms of InP-based and metamorphic high electron mobility transistors[J]. Microelectronics Reliability, 2002, **42**: 685–708. DOI: 10.1016/s0026-2714(02)00045-8.
- 56 Meneghesso G, Buttari D, Perin E, *et al.* Improvement of DC, low frequency and reliability properties of InAlAsGaAs InP-based HEMT's by means of an InP etch stop layer[J]. Technical Digest - International Electron Devices Meeting, 1998: 227–230. DOI: 10.1109/IEDM.1998.746341.
- 57 Cha E J, Wadefalk N, Moschetti G, *et al.* InP HEMTs for sub-mW cryogenic low-noise amplifiers[J]. IEEE Electron Device Letters, 2020, **41**: 1005 – 1008. DOI: 10.1109/led.2020.3000071.
- 58 Tong Z H, Ding P, Su Y B, *et al.* Surface improvement of InAlAs/InGaAs InP-Based HEMT through treatments of UV/Ozone and TMAH[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2020, **8**: 600 – 607. DOI: 10.1109/jeds.2020.3000493.
- 59 Jackson E M, Weaver B D, Ardalan S S, *et al.* Irradiation effects in InGaAs/InAlAs high electron mobility transistors[J]. Applied Physics Letters, 2001, **79**(14): 2279 – 2281. DOI: 10.1063/1.1408904.
- 60 李潇, 刘亮, 张海英, 等. 一种新的磷化铟复合沟道高电子迁移率晶体管小信号物理模型[J]. 物理学报, 2006, **55**

- (7): 3617–3621. DOI: 1000-3290/2006/55(07)/3617-05.
- LI Xiao, LIU Liang, ZHANG Haiying, *et al.* A new small signal physical model of InP-based composite channel high electron mobility transistor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(7): 3617–3621. DOI: 1000-3290/2006/55(07)/3617-05.
- 61 常明铭. 基于双掺杂层和复合沟道的InP基HEMT抗辐照加固研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- CHANG Mingming. Study on enhancement of radiation of InP-based HEMT with double Si-doped plane and composite channel[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- 62 Zhang J J, Ding P, JinY N, *et al.* A comparative study on radiation reliability of composite channel InP high electron mobility transistors[J]. *Chinese Physics B*, 2021, **30**(7): 137–142. DOI: 10.1088/1674-1056/abe2fd.
- 63 Bhattacharya S, Ajayan J, Tayal S, *et al.* Investigation on DC/RF performance of LG=19 nm heterogeneous integrated $\text{Ga}_{0.15}\text{In}_{0.85}\text{As}/\text{InAs}/\text{Ga}_{0.15}\text{In}_{0.85}\text{As}$ composite channel InP HEMT on silicon substrate for future beyond 5G and quantum computing applications[J]. *Silicon*, 2022, **14**: 9581–9588. DOI: 10.1007/s12633-022-01719-2.
- 64 Zhou S X, Qi M, Ai L K, *et al.* Effects of Si δ -doping condition and growth interruption on electrical properties of InP-based high electron mobility transistor structures [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, **32**: 097101. DOI: 10.1088/0256-307x/32/9/097101.
- 65 Li J L, Cui S H, Xu J X, *et al.* Two-dimensional electron gas characteristics of InP-based high electron mobility transistor terahertz detector[J]. *Chinese Physics B*, 2018, **27**(4): 047101. DOI: 10.1088/1674-1056/27/4/047101.
- 66 Zhong Y H, Yang B, Chang M M, *et al.* Enhancement of radiation hardness of InP-based HEMT with double Si-doped plane[J]. *Chinese Physics B*, 2020, **29**(3): 038502. DOI: 10.1088/1674-1056/ab6962.
- 67 周书星, 方仁凤, 魏彦锋, 等. 磷化铟高电子迁移率晶体管外延结构材料抗电子辐照加固设计[J]. *物理学报*, 2022, **71**(3): 290–297. DOI: 10.7498/aps.71.20211265.
- ZHOU Shuxing, FANG Renfeng, WEI Yanfeng, *et al.* Structure parameters design of InP based high electron mobility transistor epitaxial materials to improve radiation-resistance ability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(3): 290–297. DOI: 10.7498/aps.71.20211265.
- 68 Chen Y, Yang L A, Yue H B, *et al.* Investigation on effect of doped inp subchannel thickness and delta-doped InP layer of composite channel HEMT[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, **69**(3): 988 – 993. DOI: 10.1109/ted.2022.3144118.
- 69 陈翔, 邢艳辉, 韩军, 等. Al组分对MOCVD制备的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT电学和结构性质的影响[J]. *发光学报*, 2013, **34**(12): 1646–1650. DOI: 10.3788/fgxb20133412.1646.
- CHEN Xiang, XING Yanhui, HAN Jun, *et al.* Influence of Al composition on electrical and structural properties of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{AlN}/\text{GaN}$ HEMT materials grown by MOCVD[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(12): 1646–1650. DOI: 10.3788/fgxb20133412.1646.
- 70 张子砚. 影响AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT器件2DEG的因素[J]. *电子世界*, 2018: 21–22. DOI: 10.19353/j.cnki.dzsj.2018.11.007.
- ZHANG Ziyang. Factors affecting the 2DEG of AlGaIn/GaN/AlGaIn HEMT devices [J]. *Electronic World*, 2018: 21–22. DOI: 10.19353/j.cnki.dzsj.2018.11.007.
- 71 仇志军, 蒋春萍, 桂永胜, 等. 变In组分沟道的MM-HEMT材料电子输运特性研究[J]. *物理学报*, 2003, **52**(11): 2879–2882. DOI: 1000-3290/2003/52(11)/2879-04.
- QIU Zhijun, JIANG Chunping, GUI Yongsheng, *et al.* Study on electron transport characteristics of MM-HEMT material in variable In component channel[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(11): 2879 – 2882. DOI: 1000-3290/2003/52(11)/2879-04.
- 72 Zhou S X, Qi M, Ai L K, *et al.* Growth condition optimization and mobility enhancement through inserting AlAs monolayer in the InP-based $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ HEMT structures[J]. *Chinese Physics B*, 2016, **25**(9): 478–483. DOI: 10.1088/1674-1056/25/9/096801.
- 73 Ajayan J, Nirmal D, Mathew R, *et al.* A critical review of design and fabrication challenges in InP HEMTs for future terahertz frequency applications[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, **128**: 105753. DOI: 10.1016/j.mssp.2021.105753.
- 74 Asif M, Chen C, Ding P, *et al.* Improved DC and RF performance of InAlAs/InGaAs InP based HEMTs using ultra-thin 15 nm ALD- Al_2O_3 surface passivation[J]. *Solid-State Electronics*, 2018, **142**: 36 – 40. DOI: 10.1016/j.sse.2018.02.001.
- 75 Ajayan J, Nirmal D, Mohankumar P, *et al.* Investigation of impact of passivation materials on the DC/RF performances of InP-HEMTs for terahertz sensing and imaging[J]. *Silicon*, 2019, **12**(5): 1225 – 1230. DOI: 10.1007/s12633-019-00226-1.
- 76 王海丽. InP基HEMT质子辐照退化机制研究[D]. 郑

- 州: 郑州大学, 2017.
- WANG Haili. Study on proton irradiation degradation mechanism of InP based HEMT[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- 77 钟英辉, 王文斌, 孙树祥, 等. 基于BCB钝化的抗质子辐照 InP 基 HEMT 器件及其加工方法[P]. CN106972056B, 2019.
- ZHONG Yinhui, WANG Wenbin, SUN Shuxiang, *et al.* BCB passivated anti proton irradiation InP based HEMT device and a machining method[P]. CN106972056B, 2019.
- 78 钟英辉, 张佳佳, 靳雅楠, 等. 基于氮化铝/氮化硅堆叠结构和 BCB 桥的抗质子辐照 InP 基 HEMT 器件 [P]. CN111403482A, 2020.
- ZHONG Yinghui, ZHANG Jiajia, JIN Yanan, *et al.* Proton irradiation-resistant InP-based HEMT device based on aluminum nitride/silicon nitride stack structure and BCB bridge[P]. CN111403482A, 2020.
- 79 杨博. 基于 BCB 钝化的 InP 基 HEMT 辐照加固结构仿真研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- YANG Bo. Simulation study on radiation hardening of InP-based HEMT based on BCB passivation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.
- 80 王宇翔, 汤戈, 肖尧, 等. 忆阻器辐照效应研究现状及发展趋势[J]. 核技术, 2022, 45(11): 110001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110001.
- WANG Yuxiang, TANG Ge, XIAO Yao, *et al.* Research status and development trends of irradiation effects on memristor[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(11): 110001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.110001.
- 81 张付强, 陈启明, 龚艺豪, 等. 不同参数对静态随机存储器总剂量效应的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(6): 060703. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0120.
- ZHANG Fuqiang, CHEN Qiming, GONG Yihao, *et al.* Impact of different parameters on the static random access memory under the total ionizing dose[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(6): 060703. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0120.
- 82 Hu P P, Xu L J, Zhang S X, *et al.* Failure mechanisms of AlGaIn/GaN HEMTs irradiated by high-energy heavy ions with and without bias[J]. Nuclear Science and Techniques, 2025, 36: 13. DOI: 10.1007/s41365-024-01567-2.
- 83 Ohyamal H, Simoen E, Kuroda S, *et al.* Impact of high energy particles on InGaP/GaAs pseudomorphic HEMTs [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 2861–2866. DOI: 10.1109/23.736540.
- 84 Chan P W, Lo V C, Xu S D, *et al.* Intensity dependence of the deep levels of semi-insulating GaAs on the annealing temperature[J]. Journal of Materials Science Letters, 1992, 11(4): 196–198. DOI: 10.1007/BF00741419.
- 85 Kung J K, Spitzer W G. Effects of annealing on the carrier concentration of heavily Si - doped GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(2): 912–914. DOI: 10.1063/1.1662287.
- 86 Loka H S, Benjamin S D, Smith P W E. Influence of material growth and annealing conditions on recombination processes in low-temperature-grown GaAs [J]. Optics Communications, 1999, 161(4–6): 232 – 235. DOI: 10.1016/s0030-4018(99)00059-0.