

面向空间应用的 GaN 功率器件及其辐射效应

毕津顺^{1,2*}, 沈立志^{1,2}, 梅博³, 曹爽³, 孙毅³, 于庆奎³

(1. 中国科学院大学集成电路学院, 北京 100049; 2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029;

3. 中国航天宇航元器件工程中心, 北京 100029)

摘要:研究氮化镓(GaN)功率器件及其辐射效应对解决空间应用需求、促进新一代航天器建设具有重大意义。介绍了 GaN 功率器件的主要结构及工作原理,综述了近年来国内外在 GaN 功率器件的总剂量效应和单粒子效应两方面的研究进展,并对辐射效应在 GaN 功率器件中造成的退化和损伤机制进行分析与讨论。研究结果显示:GaN 功率器件具有较强的抗总剂量能力,但是抗单粒子能力较弱,易发生漏电和单粒子烧毁,且烧毁点多发生在栅极边缘的漏侧。对 GaN 功率器件辐射损伤机理的研究缺乏权威理论,有待进一步探索,为其空间应用提供理论支撑。目前,平面结构的 GaN 功率器件是主流的技术方案,单片集成及高频小型化是 GaN 功率器件未来发展的方向。

关键词: GaN 功率器件;总剂量效应;单粒子效应;空间应用

中图分类号:TN303 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2024)01-149-11



听语音
与作者
聊科研

GaN power devices and their radiation effects for space applications

BI Jinshun^{1,2*}, SHEN Lizhi^{1,2}, MEI Bo³, CAO Shuang³, SUN Yi³, YU Qingkui³

(1. School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. China Aerospace Components Engineering Center, Beijing 100029, China)

Abstract: It is of great significance to study GaN (gallium nitride) power devices and their radiation effects to meet the needs of space applications and promote the construction of a new generation spacecraft. Main structures and working principles of GaN power devices were introduced. Research progress of total ionizing dose effect and single event effect of GaN power devices in recent years was reviewed. Degradation and damage mechanisms of GaN devices caused by radiation effects were analyzed and discussed. Research results show that GaN power devices have strong resistance to total ionizing dose. However, GaN power devices are prone to leakage and single event burnout due to their weak resistance to single event burnout, and most of the burnout points occur at the drain side of the gate edge. Research on the radiation damage mechanism of GaN power devices lacks authoritative theories and needs to be further mastered to provide theoretical support for their space application. GaN power devices with planar structure are the current mainstream technical solutions. Monolithic integration, high frequency and miniaturization are the development directions of GaN power devices in the future.

Keywords: GaN power device; total ionizing dose effect; single event effect; space application

随着空间系统和卫星平台等大功率电力推进技术的不断发展,对于高频率、大功率、耐高温、耐高压、轻质量以及耐辐射的功率器件的追求已经逐渐成为下一代高效功率电子器件的发展方向^[1-3]。氮化镓(GaN)材料作为第三代宽禁带半导体材料的核心代表之一,与传统的硅(Si)和砷化镓(GaAs)材料相比,具有较高的品质因数,如图1^[2-3]所示。基于异质结形成的 GaN 高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistor, HEMT)具有尺寸小、开关速度快、电流密度大以

及散热性好等卓越的性能,有望成为空间电源系统领域里最具有前景和吸引力的候选者^[4]。

在宇宙空间中,存在恶劣的辐射环境,其主要组成部分包括质子、电子及少量重离子^[5]。辐射会在半导体器件中引入缺陷,导致器件性能退化甚至发生烧毁。根据高能粒子和半导体器件作用的方式不同,辐射效应可以分为电离效应和位移损伤效应,电离效应包括总剂量效应和单粒子效应^[6-7]。总剂量效应是材料原子吸收高能粒子在器件内部电离的能量,长时间累积形成氧化物陷

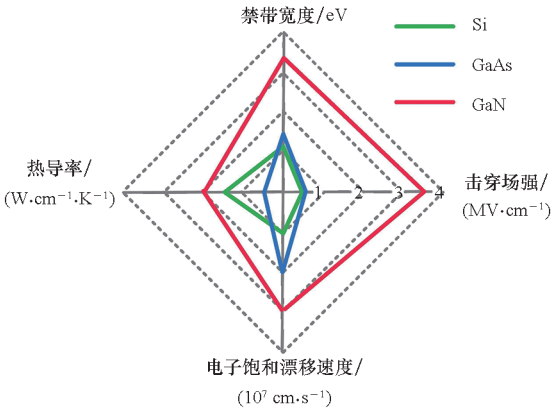


图 1 半导体材料的主要物理特性对比^[2-3]

Fig. 1 Comparison of main physical properties of semiconductor materials^[2-3]

阱电荷和界面陷阱电荷,引起器件的电学参数变化,最终退化失效。单粒子效应是由单个高能粒子撞击器件的敏感区,产生大量的电子-空穴对被器件内部电场收集,导致半导体器件出现软错误或者硬错误^[3]。软错误可以通过断电重启恢复到正常状态,通常出现在存储器 and 逻辑器件中;硬错误是不可恢复的永久损伤,典型的包括单粒子烧毁(single event burnout, SEB)和单粒子栅击穿(single event gate rupture, SEGR),它们是影响功率器件可靠性的重要威胁^[7]。航天器在轨运行的高度和倾角不同,辐射环境也不同。对于长期在轨运行(超过 5 年)的航天型号,器件的抗总剂量指标要达到 100 krad(Si)(注:1 rad = 10⁻² Gy)。单粒子效应通常采用重离子的线性能量传输(linear energy transport, LET)值描述,根据欧洲航天局的相关规定,当器件抗单粒子 LET 阈值超过 60 MeV·cm²/mg 时,可忽略单粒子效应风险。

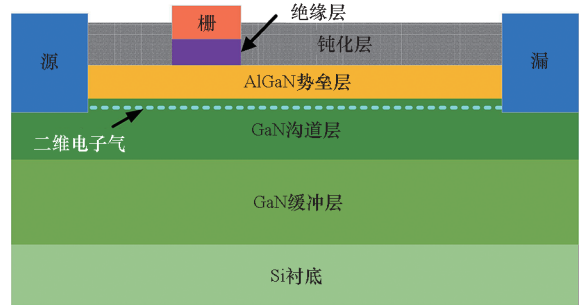
由于在 GaN HEMT 器件中,N—Ga 键和 N—Al 键结合强度高,生成的 GaN、AlN 及 AlGaIn 等化合物具有较高的稳定性,可以产生较高的位移损伤能量阈值(19 ~ 25 eV),并且二维电子气(two-dimensional electron gas, 2DEG)对 GaN 中的缺陷不敏感,所以 GaN 功率器件具有较强的抗位移损伤能力^[8-9]。GaN 的禁带宽度大,理论上也具有出色的抗电离辐射能力,但在实际中,GaN 材料内部存在高密度的缺陷,而且目前 GaN 器件对工艺要求较高,这些因素给 GaN 功率器件的抗辐射特性带来巨大的挑战。本文围绕国内外在 GaN 功率器件的研究情况,总结了 GaN 功率电子器件的典型结构,概述了 GaN 功率器件的总剂量效应和单粒子效应研究成果,并对 GaN 功率器件的辐射效应机理进行分析和讨论。

1 GaN HEMT 器件的典型结构和工作原理

早期的 GaN HEMT 器件为耗尽型(也称常开型)器件,但在空间应用领域里,出于保障系统安全运行的考虑,并且为了简化驱动电路,通常需要具备常关特性^[10],逐渐发展了增强型器件。

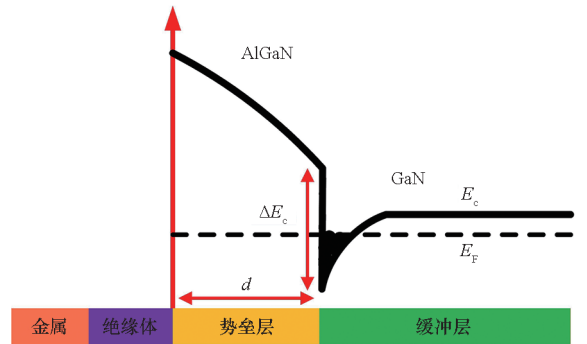
1.1 耗尽型 GaN HEMT 器件

图 2^[5]所示为耗尽型 GaN HEMT 器件剖面结构和能带示意图。图中 E_c 为导带能级, E_f 为费米能级, ΔE_c 为 AlGaIn 势垒层和 GaN 沟道层的导带差, d 为势垒层厚度。AlGaIn 与 GaN 形成异质结,在自发极化和压电极化作用下,体内会诱发指向 AlGaIn 的极化电场,场强可达 MV/cm 量级^[11],强电场可形成高密度的 2DEG。器件的源极和漏极与势垒层形成欧姆接触,在源极和漏极之间施加横向电压 V_{DS} ,控制 2DEG 在沟道中输运形成电流;栅极与势垒层之间沉积一层绝缘介质,避免栅极漏电过大,形成金属-绝缘体-半导体高电子迁移率晶体(metal-insulator-semiconductor high-electron-mobility transistors, MIS-HEMT)结构,通过栅电压 V_{GS} 对 2DEG 的耗尽作用控制沟道的导通和关断。



(a) 耗尽型 GaN HEMT 剖面结构

(a) Schematic diagram of cross-section structure of depletion-mode GaN HEMT



(b) 耗尽型 GaN HEMT 能带示意图

(b) Energy band diagram of depletion-mode GaN HEMT

图 2 耗尽型 GaN HEMT 剖面结构及能带图^[5]
Fig. 2 Schematic diagram of cross-sectional structure and energy band of depletion-mode GaN HEMT^[5]

1.2 增强型 GaN HEMT 器件

目前,围绕 GaN 基功率电子器件的增强型技术主要有以下 4 种。

1.2.1 共源共栅结构

将高压耗尽型 GaN HEMT 与低压增强型 Si 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET) 级联,形成共源共栅 (Cascode) 结构^[4],如图 3^[4]所示。

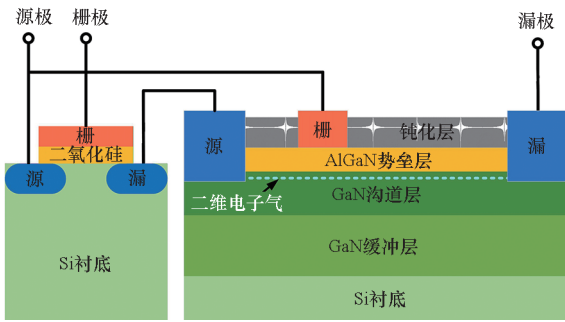


图 3 Cascode 结构示意图^[4]

Fig.3 Schematic diagram of the Cascode structure^[4]

由于现代工艺技术的进步,低压增强型 Si MOSFET 高度成熟且成本较低,它们的击穿电压、工作速度、导电电阻和电流水平能够与高于 600 V 的 GaN 器件高度匹配^[12]。从结构上看,利用低压增强型 Si MOSFET 的栅极控制器件的开启和关闭,既继承了 Si MOSFET 的高阈值电压和大跨导,同时又保持了耗尽型 GaN HEMT 高击穿电压特性。但是这种结构引入了 Si 器件,对封装要求高,还会引入寄生电感,影响器件的高频性能^[13]。

1.2.2 槽栅刻蚀形成的 MIS-HEMT 结构

通过刻蚀 AlGaN 的厚度从而局部削弱极化强度,耗尽栅极下方的 2DEG,提高器件的阈值电压 V_{th} ,实现器件的增强型^[4,13]。该技术通常将槽栅刻蚀与栅极电介质淀积相结合,引入一层绝缘介质,来抑制栅极漏电流^[10],从而形成 MIS-HEMT 或 MOS-HEMT 结构,如图 4^[4,13]所示。

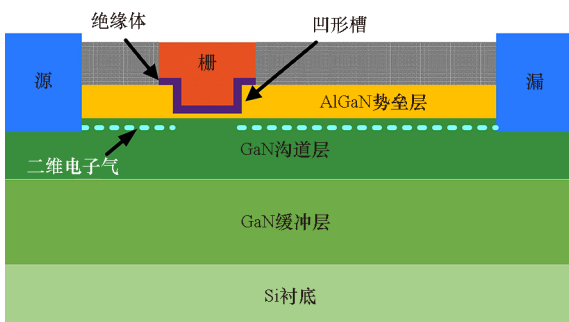


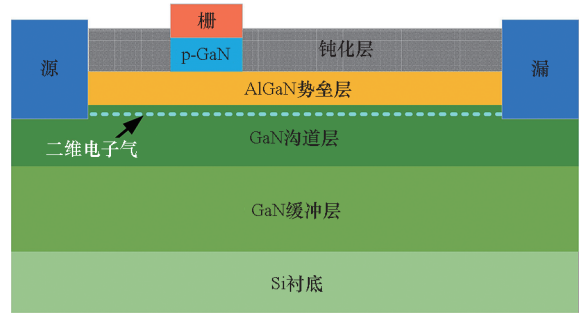
图 4 MIS-HEMT 结构示意图^[4,13]

Fig.4 Schematic diagram of MIS-HEMT structure^[4,13]

尽管这种结构可以大幅度减小器件的栅极漏电流,但也引入了电介质和氮化物之间的界面态,界面上陷阱会在器件开关转换中充放电从而导致 V_{th} 的不稳定^[4]。另外,在刻蚀的过程中,均匀性控制和刻蚀损伤也是面临的主要挑战,这些都制约着 MIS-HEMT 商业化的进程。

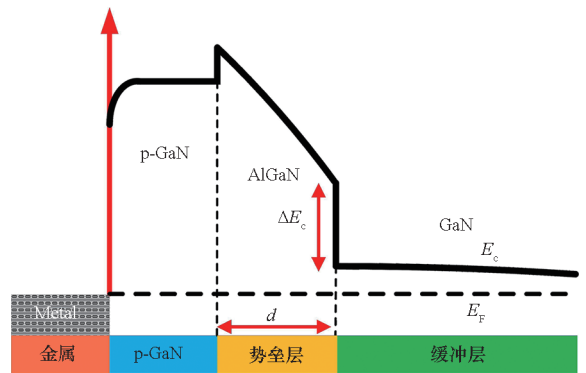
1.2.3 p-GaN 盖帽层结构

该技术是在耗尽型 GaN HEMT 栅极下引入一层 p 型材料,如图 5^[14]所示。p-GaN 可与 AlGaN 势垒层形成异质结,由于 p 型掺杂具有提高能带的作用,AlGaN 的导带被抬升,沟道中的 2DEG 被耗尽,从而获得器件的常关特性^[14]。p-GaN 盖帽层仅在栅下抬高 AlGaN/GaN 异质结的能带,不影响其他区域的 2DEG 密度,因此这种增强型器件的导通电阻低,输出电流密度大,这也是目前唯一可以商购的真正的增强型 GaN HEMT 器件^[12]。



(a) p-GaN 盖帽层结构示意图

(a) Schematic diagram of the structure with p-GaN capping layer



(b) p-GaN 盖帽层能带示意图

(b) Energy band diagram with p-GaN capping layer

图 5 p-GaN 盖帽层结构及能带图^[14]

Fig.5 Schematic diagram of structure and energy band with p-GaN capping layer^[14]

1.2.4 F 离子注入

F 离子具有很强的电负性,注入紧密晶格的异质结后易俘获自由电子并成为固定的负电

荷^[15],这些负电荷可提高肖特基栅的势垒高度,并耗尽栅极下方沟道中的 2DEG,从而形成增强型结构,如图 6^[15]所示(图中 Φ_B 为 F 离子注入前的表面能带高度, Φ_F 为注入后能带提高的高度)。然而,注入的 F 离子热稳定性较差,注入深度也不易控制,在高温下会影响器件的可靠性。该技术在商业化领域基本上已经不再采用。

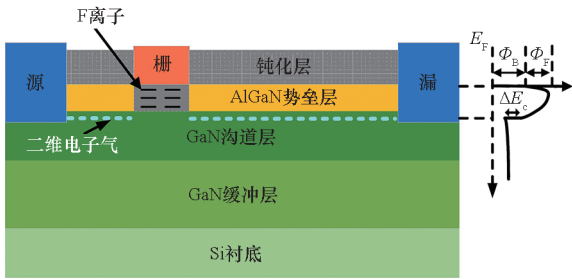


图 6 F 离子注入形成的增强型 HEMT 及其能带图^[15]

Fig. 6 Schematic diagram of normally-off HEMT and its energy band formed by F ion implantation^[15]

2 GaN HEMT 器件总剂量效应

2.1 总剂量辐照试验结果

对于 GaN 功率器件,由于采用异质结代替了栅氧化层工艺,电离产生的电荷不会在器件内部累积,理论上具有较强的抗电离辐射特性^[16]。从 21 世纪开始,国内外的科研机构对 GaN 基 HEMT 器件进行了抗辐照研究,早期辐照试验的典型结果汇总如表 1 所示。

表 1 总剂量辐照试验典型结果汇总

Tab. 1 Summary of typical results of total ionizing dose irradiation tests

年份及 研究人员	剂量/ Mrad (Si)	试验结果
2002 年 Luo 等 ^[17]	300	器件的直流特性几乎保持不变
2003 年 Vitusevich 等 ^[18]	200	器件的基本参数退化不超过 20%,仍能正常工作
2004 年 Aktas 等 ^[19]	600	阈值电压 V_{th} 仅仅漂移 -0.1 V
2005 年 Umana-Membreno 等 ^[8]	20	主要退化的是栅极漏电流,2DEG 迁移率保持大致不变
2009 年 Jha 等 ^[20]	10	直流特性和低频噪声特性退化,跨导在辐照后有恢复

根据表 1 中文献报道,辐照试验的总剂量达到几十甚至上百 Mrad(Si),试验结果显示辐照对 AlGaN/GaN HEMT 器件的影响几乎可以忽略,GaN 器件具有卓越的抗总剂量能力。

同时,也有不少学者研究了在不超过 1 Mrad(Si)的低剂量下 GaN HEMT 器件的辐照响应。Bhuiyan 等研究了 X 射线辐射和电场应力的组合效应对 MOS-HEMT 的影响^[21],试验结果如图 7^[21]所示。漏极偏压会导致 V_{th} 正向偏移,零偏压辐照会导致 V_{th} 负向偏移,而在正偏压辐照下, V_{th} 的变化则处于二者之间。

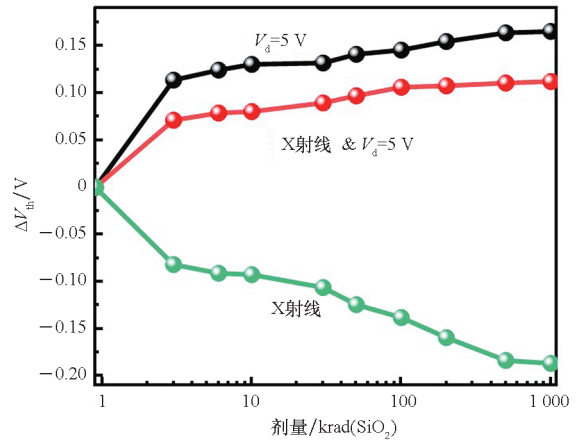


图 7 漏极偏压、零偏压辐照和正偏压辐照对 MOS-HEMT 阈值电压的影响^[21]

Fig. 7 Effects of drain bias, 0 V bias irradiation and positive-bias irradiation on the threshold voltage of MOS-HEMT^[21]

对于 MOS-HEMT 器件,通过交流跨导测量发现,当只加电应力时,在漏极偏压的驱动下,介质层中可以俘获来自栅极泄漏的电子,形成虚栅耗尽 2DEG 从而导致 V_{th} 的正向偏移。当只加 X 射线时,辐射会在栅绝缘层中诱导空穴,从而引入了氧化层固定电荷和界面态电荷,导致 V_{th} 负向偏移。而在辐射和电场应力的组合作用下,辐射诱导的空穴陷阱和偏压诱导的负电荷相互补偿, V_{th} 偏移值的大小取决于二者的相对竞争效率,这与 Sun 等研究的结果一致^[22]。

Jiang 等对 Cree 公司和 Qorvo 公司生产以及实验室研发的三种耗尽型 GaN 功率器件进行了高低不同剂量率 X 射线辐照^[23],发现耗尽型 GaN 器件没有低剂量率损伤增强效应 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS)。作为对比,陈思远等对两种不同结构的增强型 GaN 功率器件进行了高、低剂量率 ⁶⁰Co γ 辐照试验,结果表明 p-GaN 和 Cascode 结构的 GaN 功率器件都不具有

ELDRS 效应^[24]。另外,对于 p-GaN 结构,在 100 krad(Si) 辐照后,器件参数特性曲线无明显变化;对于 Cascode 结构,当辐照剂量达到 35 krad(Si) 时, V_{th} 偏移就已经超过限值,如图 8^[24] 所示。

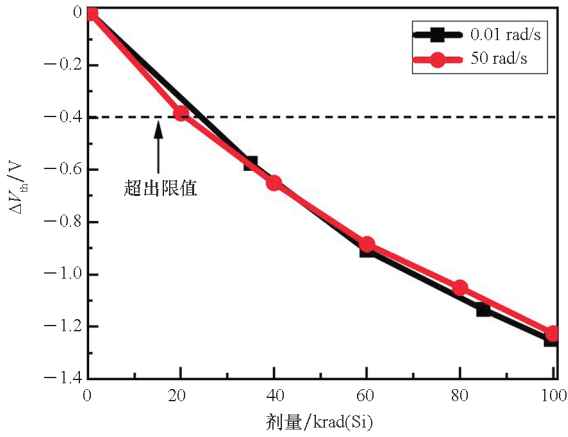


图 8 高、低剂量率辐照下 Cascode 器件的 V_{th} 退化曲线^[24]

Fig. 8 V_{th} degradation curve of Cascode devices under high and low dose rate irradiation^[24]

从试验结果来看,p-GaN 结构的器件具有较强的抗总剂量特性。由于栅和沟道之间没有氧化层,总剂量辐照主要在 AlGaN 势垒层和 GaN 沟道层界面产生界面态陷阱,从而引起器件的性能退化。势垒层的厚度较薄,辐照产生的陷阱电荷迁移率较低,从而大大减少了界面态电荷数量,这或许是 p-GaN 结构的器件抗总剂量能力强的原因。另外,对于 p-GaN 结构的器件,材料本身存在高密度的缺陷,辐照即使产生更多的缺陷也不会影响它的性能^[25]。陈睿等的研究表明,p-GaN 结构的器件抗总剂量效应水平高达 1 Mrad(Si)^[26]。

Cascode 结构的器件性能退化较为明显,这可能是由于 Si 基 MOS 管对总剂量效应敏感,辐照在二氧化硅层产生氧化物陷阱电荷引起的。

2.2 总剂量效应机理分析

受制于材料质量、工艺水平和器件结构等多种因素的影响,总剂量辐照导致 GaN 功率器件性能退化的物理机制尚未形成明确的共识,不同课题组下的研究结果也会存在矛盾之处,对比多数研究者的试验结果,可做如下讨论:

1) 对于不加电状态下的辐照,可以认为是 X 或 γ 射线在 AlGaN 势垒层中引入了受主型缺陷所致。Emtesv 等利用拉曼光谱研究了 GaN HEMT 器件中 γ 辐照产生的缺陷,发现辐照会同时引入相互补偿的缺陷——氮空位和间隙氮原子,并且

这两种缺陷产生率相同,取决于样品的掺杂水平^[27-28]。氮空位呈现施主态,能级很浅、靠近导带,而间隙氮原子呈现受主态,能级接近禁带中线^[29]。以耗尽型的 AlGaN/GaN HEMT 器件异质结能带图为例,如图 9^[19] 所示(图中 E_v 为价带能级)。由于采用肖特基栅,栅极下的 AlGaN 层能带倾斜度更大。栅极零偏压下,靠近栅极的部分受主缺陷能级位于费米能级 E_F 上方,失去电子变为中性,同时将电子贡献给沟道,使得沟道 2DEG 密度增加, V_{th} 负向偏移^[19,30]。AlGaN 势垒层缺陷的电荷不守恒,呈现施主态,即空穴陷阱。但是由于受主缺陷数量较少,贡献的电荷数量有限,漏极电流 I_{DS} 和 V_{th} 变化不明显。

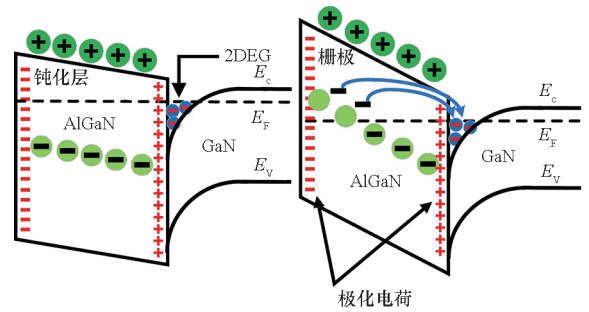
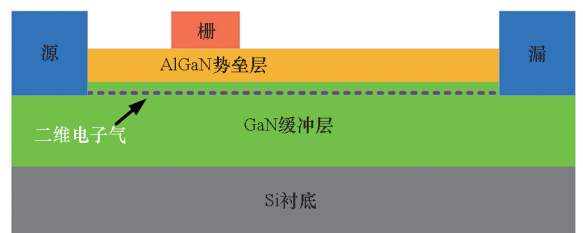


图 9 钝化层和栅极下的能带结构示意图^[19]

Fig. 9 Schematic of the band structure under the passivation layer and gate^[19]

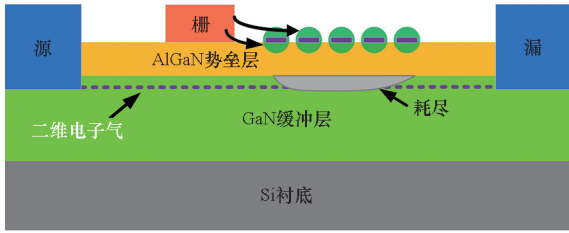
2) 对于加电状态下的辐照,由于 γ 射线能量高,具有较强的穿透力。通常情况下, γ 射线与栅极作用产生大量的电子-空穴对会迅速复合^[7],但在电应力下,由于栅极边缘处存在强电场,更多的电子会从栅极隧穿到栅漏之间的势垒层,如图 10^[30] 所示。势垒层中俘获电子的陷阱表现为负电荷,形成虚栅,对沟道中的 2DEG 有耗尽作用,导致漏串联电阻增加,漏极电流 I_{DS} 下降, V_{th} 正向偏移。但是辐射本身会在 AlGaN 层引入施主态陷阱,器件的最终退化程度取决于电应力和辐照的共同作用结果。

总结国内外研究结果可以得出,GaN HEMT 器件的抗电离总剂量能力较强,特别是对于 p-



(a) 无电应力

(a) Without electrical stress



(b) 有电应力
(b) Under electrical stress

图 10 电应力前后器件的电荷分布图^[30]

Fig. 10 Schematic diagram of the charge distribution of the device before and after electrical stress^[30]

GaN 结构的器件,对总剂量辐照不敏感,有望用于空间电源系统。

3 GaN HEMT 器件单粒子效应

3.1 重离子辐照试验结果

关于 GaN HEMT 器件的单粒子效应,国内外开展了广泛的试验研究,多数结果表明 GaN 功率器件的抗单粒子能力偏弱,对 SEB 较为敏感。

在单粒子试验中,采用不同 LET 值的重离子对四家主流厂商生产的商业增强型 GaN HEMT 器件进行辐照,结果汇总如表 2 所示。

表 2 不同 LET 值和偏压下 GaN HEMT 器件的重离子试验结果

Tab. 2 Heavy ion test results of GaN HEMT devices with different LET values and bias voltages

生产厂商及 额定电压	入射离子 (LET)/(MeV · cm ² /mg)	偏置电压/ V	试验现象
Panasonic (600 V) ^[31]	Pr(60)	200,300	无 SEB
		400	SEB
	Ag(43.6)	300,325	无 SEB
		600	SEB
	Cu(20)	550	无 SEB
		575	SEB
GaN system (650 V) ^[31]	Pr(60)	100,200	无 SEB
		300	SEB
	Ag(42)	275,300	无 SEB
		350	SEB
	Xe(40)	200,300	无 SEB
		400	SEB
Transphorm (900 V) ^[26]	Ti(21.8)	50	无 SEB
		100	SEB

续表

生产厂商及 额定电压	入射离子 (LET)/(MeV · cm ² /mg)	偏置电压/ V	试验现象
EPC (40 V) ^[32]	Kr(25)	40	无 SEB
EPC (100 V) ^[33]	I(49.6)	20 ~ 90	无 SEB, 关态漏电 流增加
		100	SEB
		Ag(43)	200
EPC (200 V) ^[34]	Au(86)	120 ~ 160	无 SEB, 关态漏电 流增加
		200	SEB

从试验结果汇总的数据可以看出:

1) 工作在低于额定电压下的器件不易发生 SEB,表明低电压下的 GaN HEMT 器件具有较强的抗单粒子烧毁能力。Lidow 等证明了 40 V p-GaN 结构的器件在 LET 值高达 89 MeV · cm²/mg 的重离子辐照下,没有出现任何故障^[35]。

2) 较低 LET 离子辐射作用下,不易发生 SEB,甚至不会出现性能退化。陈睿等的研究结果显示在 LET 值为 37 MeV · cm²/mg 的重离子辐照下,650 V p-GaN 结构的器件的电学参数没有明显变化^[26]。随着 LET 值的增加,发生 SEB 的阈值电压越低,大幅度降低了器件的性能。LET 值越高,电离注入的电荷越多^[36],因此器件抗单粒子能力越差。对于不同重离子的辐照,Mizuta 等的研究发现 SEB 的发生仅取决于离子的 LET 值和漏极偏压,而与离子种类、能量和射程无关,且最恶劣的栅极偏置条件是栅偏压为 0 V 或更低^[37],这一点与 Scheick 等^[32]的发现一致。

3) 重离子辐照会对器件造成累积损伤,导致泄漏电流增加。Abbate 等研究表明,当偏置电压以 10 V 的步长从 20 V 到 90 V 变化时,每次辐照后,漏极泄漏电流都有增加^[33]。这种辐照损伤是由于重离子在入射轨迹非常小的区域内释放出大量的能量,这导致温度大幅上升,造成器件的永久性损伤,从而导致关态漏电流增加。研究发现关态漏电流随入射离子注量和漏极偏置电压的增加而增大。关于漏极电流的增加,存在两种解释。一种是在源极和漏极之间漏电流:Scheick 等分析最靠近栅极边缘的漏侧经

受最大的电场应力,对该区域的离子撞击可能会损坏栅极结构,使得器件的栅极局部开启^[32]。栅极损伤降低了局部区域的 V_{th} ,在漏极和源极之间引入了泄漏路径,漏电增大,但这种机制只会影响栅极区域的 AlGaN 势垒层的结构,不会导致栅极电流增加。另外一种是在栅极和漏极之间漏电:Kuboyama 等在试验中发现栅极和漏极泄漏电流同时增加,并且它们的数量级和变化幅度也相同^[38]。这表明重离子辐照在肖特基栅极接触处引入了漏电路径,电流从漏极流向栅极,导致二者的泄漏电流同时增大。

4) 在相同辐射条件下,不同厂家生产的 GaN 器件发生 SEB 的阈值电压不同,表明 GaN 器件的单粒子效应敏感性与器件的结构和工艺参数有关,这为 GaN 器件的抗辐射加固提供了可行性。

由于 SEB 的机制尚未完全开发,对 GaN 功率器件的单粒子效应研究结果也各不相同。通过失效分析发现,栅极区域的毁坏会引起漏极电流增大,从而导致器件的灾难性损坏,这是 GaN 器件发生 SEB 的典型特征,即多数故障发生在栅极边缘的漏侧,如图 11^[26,36]所示。

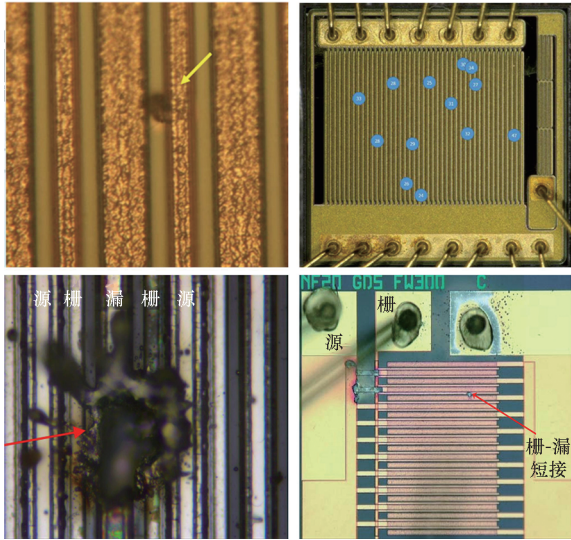


图 11 显微镜下 GaN 器件 SEB 故障点(栅极边缘)^[26,36]
Fig. 11 SEB failure points (located at the gate edge) of GaN device under microscope^[26,36]

Liang 等利用金相显微镜对 Cascode 结构器件的损伤部位进行分析,发现高压耗尽型 GaN HEMT 的栅区和漏区之间有明显烧毁现象^[39],分析认为重离子入射诱发的电子在栅极边缘高电场的作用下不断向 AlGaN 势垒层注入并形成积累,最终隧穿栅势垒,形成了一条栅漏导电路径,导致器件的源漏端出现大电流,引发 SEB。

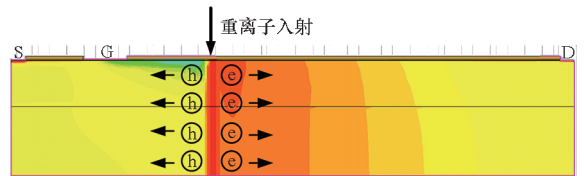
Martinez 等通过对烧毁器件进行失效分析发

现,始终存在一个随机位于栅极和漏极之间的区域,将栅极和漏极短接^[40]。通过捕捉示波器的波形发现,SEB 发生时,漏极电压同时下降,栅极电压急剧上升。其分析认为是由于重离子撞击栅极和漏极之间的高电场区域,电离的电荷在空间电荷区雪崩,促使栅极和漏极短暂连接。当栅极电压升高后,发生一系列不可逆过程,如栅控沟道的强开启、栅源之间电介质的击穿、泄漏电流瞬间产生大量热量等,导致器件发生 SEB。对这一假设还需要进一步分析验证。

仿真研究发现,在高漏极偏压下,器件的峰值电场集中在栅极边缘的漏侧,当重离子入射到这一区域时,高电场可以加速载流子碰撞电离产生更多的载流子,触发背沟道效应和双极晶体管效应^[41],发生 SEB。Zerarka 等通过对 p-GaN 结构的 GaN 器件进行仿真分析,提出单粒子烧毁机制:重离子在高电场下诱发雪崩现象,短时间集聚大量能量,产生较大的位移电流,造成器件发生 SEB^[42]。这种机制与 Scheick 等的推论一致。Zhen 等通过仿真在 p-GaN 结构的基础上提出一种具有栅漏双场板的抗辐射加固结构^[43],场板的引入不仅可以提高器件的击穿电压,而且可以优化电场分布,缓解原有的电场峰值^[44],降低载流子的碰撞产生率,有效地降低了触发 SEB 的可能性。王颖团队仿真发现栅场板区域存在的强电场是器件的敏感区域,并提出多种抗辐射加固结构^[45-48]。

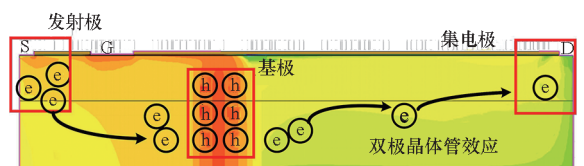
3.2 单粒子效应机理分析

目前,国际上还未形成权威的 GaN HEMT 器件单粒子损伤机理。结合国内外对 GaN HEMT 器件的重离子试验及仿真结果,单粒子损伤机理可能与两种机制有关,如图 12^[41]所示。



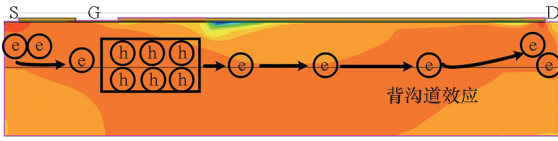
(a) 重离子入射瞬间

(a) The moment of heavy ion impact



(b) 双极晶体管效应示意图

(b) Schematic diagram of the bipolar effect



(c) 背沟道效应示意图

(c) Schematic diagram of the back-channel effect

图 12 两种物理机制^[41]

Fig. 12 Two physical mechanisms^[41]

1) 双极晶体管效应:当重离子穿过器件的有源区时,沿着离子轨迹会产生大量的电子-空穴对。电子在漏极处被快速收集,在 GaN 缓冲层中留下多余的空穴,降低了源极和缓冲层的势垒。因此电子开始由源极(寄生双极晶体管的发射极)注入基极(离子碰撞后剩余的过量空穴),并在漏极(寄生双极晶体管的集电极)被收集,导致寄生双极晶体管的导通^[33,41]。

2) 背沟道效应:栅极下方聚集的正电荷降低了源极和沟道间的势垒,从而允许电子通过沟道从源极注入漏极,形成大电流^[45]。

仿真研究发现,当 GaN HEMT 器件处于高漏极偏压下,在栅极边缘的漏侧或栅场板的末端存在峰值电场,当重离子入射到这一区域时,会碰撞电离产生大量的电子-空穴对。由于栅极下可移动载流子数量增加,栅极下方区域的电阻和承受的电压减小,电场随时间向漏极转移,漏端的电场逐渐增大,如图 13^[43,47] 所示。漏极附近的高电场使流入漏极的电子碰撞电离率更大,集聚的载流子密度高,触发瞬态大电流导致器件发生 SEB。

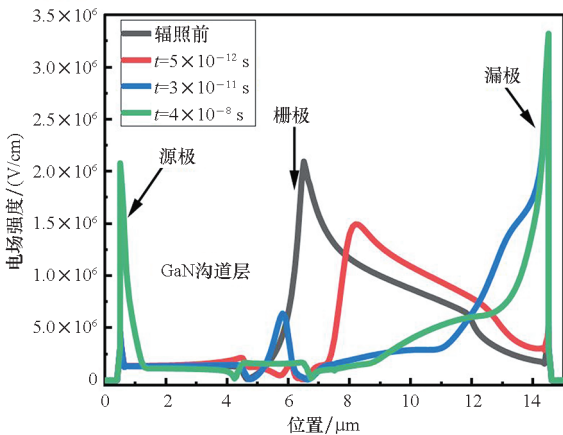


图 13 重离子撞击后 GaN 沟道层电场的变化^[43,47]

Fig. 13 Variation of electric field in GaN channel layer after heavy ion's striking^[43,47]

国内外对 GaN 功率器件的单粒子效应的研究取得了一定的成果,但已有的数据和仿真模型还不能清晰、完整地解释 GaN 功率器件发生 SEB

的机制。不同结构的 GaN 器件的单粒子敏感区域是否相同? 温度对单粒子试验是否有影响? 重离子辐照引起的漏电与 SEB 是否有联系? 上述一系列问题需要进一步探索。目前的仿真实验未涉及 GaN 功率器件的性能退化,离子入射角度等因素对于器件的影响也缺乏充分的数据,需要继续开展试验研究,结合微观物理分析和仿真验证手段,探索 GaN 功率器件发生单粒子效应的内在机理,并为器件加固提供理论支撑。

4 宇航级 GaN 功率器件的应用与展望

目前围绕着 GaN 功率电子器件的研发工作主要分为两种方案:一种是制作垂直结构的 GaN 器件,另一种是在 Si 衬底上制作平面结构的 GaN 器件。相比于平面结构而言,垂直结构的 GaN 功率器件可以减缓表面态引起的电流崩塌效应、获得更高的击穿电压和提高功率密度,但发展相对缓慢,而基于 HEMT 结构的平面型 GaN 器件是目前的主流技术方案。图 14^[49] 是法国原子能委员会电子与信息技术实验室规划的 GaN 功率器件技术路线图^[49]。对于中低功率 GaN 器件,由 GaN 晶体管逐渐向单片集成的片上系统发展;对于高功率 GaN 器件,朝着超紧凑型智能功率模块发展。因此,减小器件的尺寸和质量、提高器件的可靠性和系统的功率密度、降低成本是 GaN 功率器件的发展趋势。

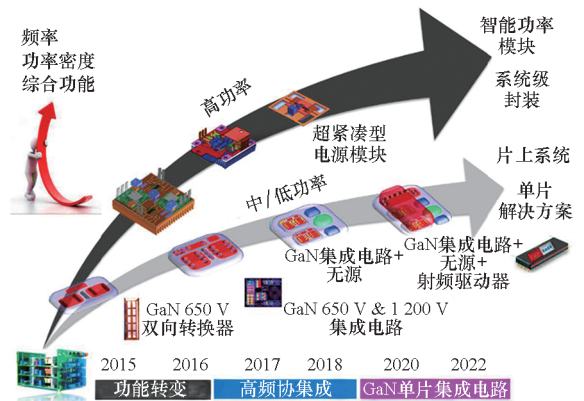


图 14 GaN 功率器件技术路线图^[49]

Fig. 14 Technology road map of GaN power devices^[49]

对于宇航级 GaN 功率器件,国外已经推出部分产品,但也还处于探索阶段。美国 Intersil 公司在 2018 年发布了第一款 100 V 宇航级 GaN 功率器件的产品。2020 年,美国 Teledyne e2v HiRel 公司与加拿大 GaN Systems 公司合作推出 100 V/90 A GaN HEMT 器件,满足军事和宇航应用。日本瑞萨电子公司在 2018 年成功研制了航天工业

级 GaN HEMT 驱动器,同年松下公司发布了 MIS-HEMT 型 GaN 功率器件^[50],满足日本宇航局的抗辐射要求。为了满足空间应用,国内外针对 GaN 功率器件提出了多种抗辐照加固方案。从工艺角度,提高 GaN 沟道层的厚度可以降低异质结中位错和缺陷的密度,改善器件的抗辐射特性;在器件表面淀积钝化层可以抑制界面态密度^[51],提高 GaN 器件的抗辐射能力。从结构角度,除了缓存层引入掺杂塞^[45]、嵌入肖特基接触^[48]、引入背势垒层和场板结构等技术之外,Liu 等提出了 AlGaIn 沟道层结构的 GaN 功率器件,不仅将关态泄漏电流降低了两个数量级,仿真发现还提高了器件的 SEB 阈值^[52]。这些研究成果有助于推动宇航级 GaN 功率器件在新一代航天器中的应用,促进我国第三代半导体器件的发展。

5 总结

本文介绍了目前 GaN 功率电子器件的主要结构,综述了近年来国内外对 GaN 功率器件的总剂量效应和单粒子效应的研究成果,并对 GaN 功率器件的总剂量效应和单粒子效应的机理进行了分析和讨论。试验数据表明,GaN 功率器件具有较强的抗总剂量能力,但是抗单粒子能力较弱,易发生漏电和单粒子烧毁。虽然目前对于单粒子辐照下 GaN 功率器件损伤机理有不少研究,但缺乏权威结论。为了满足空间应用需求、促进新一代航天器发展,需要继续针对 GaN 功率器件的辐照效应开展试验,进一步研究 GaN 功率器件的辐照损伤机理,建立辐射缺陷演化的物理模型,并为器件加固提供理论支撑,这也将是未来一段时间内 GaN 功率器件的研究热点。

参考文献 (References)

- [1] 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 S Z. Study on the irradiation induced damage of AlGaIn/GaN HEMT devices [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)
- [2] 董世剑. GaN 基 HEMT 器件电离辐照损伤规律及物理机制研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2020.
DONG S J. Study on ionizing radiation damage law and physical mechanism of GaN-based HEMT devices [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020. (in Chinese)
- [3] 熊妮. Si 基 GaN 功率器件辐照失效机理与可靠性研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
XIONG W. Research on irradiation failure mechanism and reliability of GaN-on-Si power devices [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [4] 黄森,杨树,唐智凯,等. 面向高性能 GaN 基功率电子的器件物理研究[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2016,46(10):107307.
HUANG S, YANG S, TANG Z K, et al. Device physics towards high performance GaN-based power electronics [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2016, 46(10): 107307. (in Chinese)
- [5] 张飞. GaN HEMT 抗单粒子辐照加固结构模拟研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2020.
ZHANG F. Simulation study of GaN HEMT hardened structure with single event irradiation [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020. (in Chinese)
- [6] 谭桢,魏志超,孙亚宾,等. 功率半导体器件辐射效应综述[J]. 微电子学,2017,47(5):690-694.
TAN Z, WEI Z C, SUN Y B, et al. Review of radiation effects in power semiconductor devices [J]. Microelectronics, 2017, 47(5): 690-694. (in Chinese)
- [7] 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,2013.
LYU L. Study of radiation effects of GaN-based semiconductor materials and HEMTs [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [8] UMANA-MEMBRENO G A, DELL J M, PARISH G, et al. Effect of ⁶⁰Co gamma-irradiation on two-dimensional electron gas transport and device characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs [J]. Physica Status Solidi (c), 2005, 2(7): 2581-2584.
- [9] SCHWARZ C, YADAV A, SHATKHIN M, et al. Gamma irradiation impact on electronic carrier transport in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(6): 062102.
- [10] WELLEKENS D, STOFFELS S, LUU A, et al. Architecture choice for radiation-hard AlGaIn/GaN HEMT power devices [C]//Proceedings of 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2019.
- [11] 魏巍,林若兵,冯倩,等. 场板结构 AlGaIn/GaN HEMT 的电流崩塌机理[J]. 物理学报,2008,57(1):467-471.
WEI W, LIN R B, FENG Q, et al. Current collapse mechanism of field-plated AlGaIn/GaN HEMTs [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(1): 467-471. (in Chinese)
- [12] CHEN K J, HÄBERLEN O, LIDOW A, et al. GaN-on-Si power technology: devices and applications [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(3): 779-795.
- [13] 伍文俊,兰雪梅. GaN FET 的结构、驱动及应用综述[J]. 电子技术应用,2020,46(1):22-29,38.
WU W J, LAN X M. Overview on GaN FET structure, driving and its application [J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(1): 22-29, 38. (in Chinese)
- [14] GRECO G, IUCOLANO F, ROCCAFORTE F. Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, 78: 96-106.
- [15] CHEN K J, YUAN L, WANG M J, et al. Physics of fluorine

- plasma ion implantation for GaN normally-off HEMT technology[C]//Proceedings of International Electron Devices Meeting, 2011.
- [16] 谷文萍, 张进城, 王冲, 等. ^{60}Co γ 射线辐射对 AlGaIn/GaN HEMT 器件的影响[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 1161–1165.
GU W P, ZHANG J C, WANG C, et al. Influence of ^{60}Co γ -ray irradiation on AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2): 1161–1165. (in Chinese)
- [17] LUO B, JOHNSON J W, REN F, et al. Influence of ^{60}Co γ -rays on dc performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(4): 604–606.
- [18] VITUSEVICH S A, KLEIN N, BELYAEV A E, et al. Effects of γ -irradiation on AlGaIn/GaN-based HEMTs[J]. Physica Status Solidi (a), 2003, 195(1): 101–105.
- [19] AKTAS O, KULIEV A, KUMAR V, et al. ^{60}Co gamma radiation effects on DC, RF, and pulsed I-V characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs [J]. Solid-State Electronics, 2004, 48(3): 471–475.
- [20] JHA S, JELENKOVIĆ E V, PEJOVIĆ M M, et al. Stability of submicron AlGaIn/GaN HEMT devices irradiated by gamma rays [J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86(1): 37–40.
- [21] BHUIYAN M A, ZHOU H, CHANG S J, et al. Total-ionizing-dose responses of GaN-based HEMTs with different channel thicknesses and MOSHEMTs with epitaxial MgCaO as gate dielectric[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(1): 46–52.
- [22] SUN X, SAADAT O I, CHEN J, et al. Total-ionizing-dose radiation effects in AlGaIn/GaN HEMTs and MOSHEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6): 4074–4079.
- [23] JIANG R, ZHANG E X, MCCURDY M W, et al. Dose-rate dependence of the total-ionizing-dose response of GaN-based HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(1): 170–176.
- [24] 陈思远, 于新, 陆妩, 等. 增强型氮化镓功率器件的总剂量效应[J]. 微电子学, 2021, 51(3): 444–448.
CHEN S Y, YU X, LU W, et al. Total ionizing dose effect of enhancement-mode GaN power devices[J]. Microelectronics, 2021, 51(3): 444–448. (in Chinese)
- [25] QI Y L, WANG D G, ZHOU J J, et al. Effect of X-ray irradiation on threshold voltage of AlGaIn/GaN HEMTs with p-GaN and MIS gates [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2020, 3(4): 241–243.
- [26] 陈睿, 梁亚楠, 韩建伟, 等. 氮化镓基高电子迁移率晶体管单粒子和总剂量效应的实验研究[J]. 物理学报, 2021, 70(11): 116102.
CHEN R, LIANG Y N, HAN J W, et al. Single event effect and total dose effect of GaN high electron mobility transistor using heavy ions and gamma rays[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(11): 116102. (in Chinese)
- [27] LOOK D C, REYNOLDS D C, HEMSKY J W, et al. Defect donor and acceptor in GaN [J]. Physical Review Letters, 1997, 79(12): 2273–2276.
- [28] EMTSEV V V, DAVYDOV V U, LUNDIN V V, et al. Annealing behaviour of electrically active point defects in gamma-irradiated n-GaN films[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 210(1/2/3): 273–277.
- [29] UMANA-MEMBRENO G A, DELL J M, HESSLER T P, et al. ^{60}Co gamma-irradiation-induced defects in n-GaN [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(23): 4354–4356.
- [30] 曹延琴. GaN 基 HEMT 器件的辐照效应研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
CAO Y Q. Study of radiation effects of GaN-based HEMTs[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [31] SCHEICK L Z. Recent gallium nitride power HEMT single-event testing results [C]//Proceedings of IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), 2016.
- [32] SCHEICK L. Determination of single-event effect application requirements for enhancement mode gallium nitride HEMTs for use in power distribution circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(6): 2881–2888.
- [33] ABBATE C, BUSATTO G, IANNUZZO F, et al. Experimental study of single event effects induced by heavy ion irradiation in enhancement mode GaN power HEMT[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(9/10): 1496–1500.
- [34] VAN VONNO N W, MANSILLA O, GILL J S, et al. Destructive single-event effects testing of the Intersil ISL70023SEH and ISL70024SEH gallium nitride power transistors[C]//Proceedings of IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), 2017.
- [35] LIDOW A, NAKATA A, REARWIN M, et al. Single-event and radiation effect on enhancement mode gallium nitride FETs [C]//Proceedings of IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), 2014.
- [36] SCHEICK L. A mechanism for destructive single-event effect in gallium nitride power HEMTs [C]//Proceedings of 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), 2017.
- [37] MIZUTA E, KUBOYAMA S, NAKADA Y, et al. Single-event damage observed in GaN-on-Si HEMTs for power control applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1956–1963.
- [38] KUBOYAMA S, MARU A, SHINDOU H, et al. Single-event damages caused by heavy ions observed in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6): 2734–2738.
- [39] LIANG Y N, CHEN R, HAN J W, et al. The study of the single event effect in AlGaIn/GaN HEMT based on a cascode structure[J]. Electronics, 2021, 10(4): 440.
- [40] MARTINEZ M J, KING M P, BACA A G, et al. Radiation response of AlGaIn-channel HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 66(1): 344–351.
- [41] ONODA S, HASUIKE A, NABESHIMA Y, et al. Enhanced charge collection by single ion strike in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013,

- 60(6): 4446–4450.
- [42] ZERARKA M, AUSTIN P, BENSOUSSAN A, et al. TCAD simulation of the single event effects in normally-OFF GaN transistors after heavy ion radiation[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2017, 64(8): 2242–2249.
- [43] ZHEN Z X, FENG C, WANG Q, et al. Single event burnout hardening of enhancement mode HEMTs with double field plates[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(9): 2358–2366.
- [44] 刘建华, 郭宇锋, 黄晓明, 等. GaN HEMT 场板研究综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 9–14.
LIU J H, GUO Y F, HUANG X M, et al. Review on field plate structure in GaN HEMT [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2020, 40(1): 9–14. (in Chinese)
- [45] LUO X, WANG Y, HAO Y, et al. Research of single-event burnout and hardening of AlGaIn/GaN-based MISFET [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(2): 1118–1122.
- [46] ZHANG F, WANG Y, WU X, et al. An SEB hardened AlGaIn/GaN HEMT with barrier interlayer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12445–12451.
- [47] FEI X X, WANG Y, LUO X, et al. Research of single-event burnout and hardened GaN MISFET with embedded PN junction [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 110: 113699.
- [48] WANG Y, FEI X X, WU X, et al. Simulation study of single-event burnout in GaN MISFET with Schottky element[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(12): 5466–5471.
- [49] AMANO H, BAINES Y, BEAM E, et al. The 2018 GaN power electronics roadmap[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(16): 163001.
- [50] 伍尚慧, 张轩瑞, 李姗玉. 日本航天元器件发展现状研究[J]. 国际太空, 2019(3): 22–25.
WU S H, ZHANG X R, LI S Y. Research on the development status of aerospace components in Japan [J]. Space International, 2019(3): 22–25. (in Chinese)
- [51] 席善斌, 高金环, 裴选, 等. 基于工艺的 GaN HEMT 抗辐射加固研究进展[J]. 微处理机, 2019, 40(2): 1–6.
XI S B, GAO J H, PEI X, et al. Research progress on radiation hardening of GaN HEMT based on process [J]. Microprocessors, 2019, 40(2): 1–6. (in Chinese)
- [52] LIU S, ZHANG J C, ZHAO S L, et al. Simulation research on single event burnout performances of p-GaN gate HEMTs with 2DEG $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ channel [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(3): 973–980.

(编辑:熊立桃,罗茹馨)