

文章编号: 2095-4980(2022)06-0535-09

氮化镓 HEMT 器件辐射效应综述

吕航航^{a,b}, 曹艳荣^{*a,b}, 马毛旦^{a,b}, 张龙涛^{a,b}, 任晨^{a,b}, 王志恒^{a,b},
吕玲^a, 郑雪峰^b, 马晓华^b

(西安电子科技大学 a. 机电工程学院; b. 宽带隙半导体技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: 在高频、大功率、高温、高压等领域, 氮化镓高电子迁移率晶体管(HEMT)器件因其优异的耐辐射性能而被广泛地应用于卫星、太空探测、核反应堆等领域。尽管从理论和一些试验研究中可以得知, 氮化镓材料具有良好的耐辐射特性, 但在实际应用中, 因其制作工艺及结构等因素的影响, 氮化镓 HEMT 器件的耐辐射特性受到了很大的影响和挑战。本文介绍了氮化镓 HEMT 器件几种辐射效应, 并对氮化镓 HEMT 器件辐射的研究进行了综述。

关键词: 氮化镓 HEMT 器件; γ 射线辐射; 质子辐射; 中子辐射; 电子辐射

中图分类号: TN322; TL818

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022012

Review of radiation effects on GaN HEMT devices

LYU Hanghang^{a,b}, CAO Yanrong^{*a,b}, MA Maodan^{a,b}, ZHANG Longtao^{a,b}, REN Chen^{a,b},
WANG Zhiheng^{a,b}, LYU Ling^a, ZHENG Xuefeng^b, MA Xiaohua^b

(a.School of Electro-Mechanical Engineering; b.State Key Subject Laboratory of Wide Band Gap Semiconductor Technology, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: GaN High Electron Mobility Transistor(HEMT) devices have superior advantages in high-frequency, high-power, high-temperature and high-pressure applications, and due to the excellent radiation resistance characteristics of gallium nitride materials, the devices are useful in radiation environments such as satellites, space exploration, and nuclear reactors. Although the theory and some existing experimental results have shown that GaN materials have excellent radiation resistance properties, in actual situations, the radiation resistance properties of GaN HEMT devices are greatly affected and challenged due to the influence of the device manufacturing process and structure. The major radiation effects of GaN HEMT devices are discussed, and the radiation research of GaN HEMT devices is reviewed.

Keywords: GaN HEMT devices; Gamma irradiation; proton irradiation; neutron irradiation; electron irradiation

基于宽禁带半导体材料的特性优点, 氮化镓(GaN)基高电子迁移率晶体管(HEMT)在高频、大功率、高温、高压等领域有极好的应用前景, 再加上其优异的耐辐射特性, 该器件在卫星、太空探测、核反应堆等领域也有广阔的发展空间, 因此, 核辐射环境与半导体器件的关系愈来愈密切, 同时对器件的可靠性提出了更高的要求。尽管从理论和一些试验研究中可以得知氮化镓材料具有良好的耐辐射特性, 但实际情况是, 异质外延生长的氮化镓材料会不可避免地存在高密度的缺陷, 并且氮化镓 HEMT 器件采用了比较复杂的氮化镓异质结材料结构, 这种异质结材料特性对表面和界面高度敏感, 这些情况会极大地限制氮化镓材料和 HEMT 器件的耐辐射性能。在工作环境中, 半导体材料及器件所受的辐射量, 主要与辐射环境和工作条件有关, 很多类型的辐射都可以使氮化镓 HEMT 器件产生退化, 甚至损坏器件。本文介绍了 γ 射线辐射、质子辐射、电子辐射、中子辐射对氮化镓

收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-03-17

基金项目: 北京智芯微电子科技有限公司实验室开放基金项目; 国家自然科学基金资助项目(11690042; U1866212; 12035019; 61727804; 11690040);

*通信作者: 曹艳荣 yrcao@mail.xidian.edu.cn

HEMT 器件的影响, 以及氮化镓 HEMT 器件在这些辐射下的退化机理, 并对氮化镓 HEMT 器件在各种辐射下的研究进行了综述。

1 氮化镓 HEMT 器件的辐射效应

由于氮化镓 HEMT 器件受材料和器件制造工艺以及器件结构的影响, 其抗辐射特性并没有被很好地发挥, 因此工作在具有辐射的环境中的氮化镓器件仍面临着各种辐射源对其的危害。不同能量、不同注量的粒子辐射器件, 在器件材料中引入了各种不同的缺陷, 这将会影响氮化镓 HEMT 器件的直流参数和小信号参数, 使其特性产生一定程度的退化^[1]。但不同类型的辐射效应造成氮化镓 HEMT 器件产生损伤退化的机理会有所差异。

1.1 γ 射线辐射

γ 射线是由原子核能级跃迁蜕变时释放出的电磁辐射, 其速度为光速, 能量非常大且具有很强的穿透力。但是由于地球大气层的阻挡作用, 绝大多数的 γ 射线拥有的能量小于穿过大气层所需的能量, 因此很少有 γ 射线穿透大气层到达地表。在实验中, 常用的辐射源是钴(⁶⁰Co)和铯(¹³⁷Cs)。

常规氮化镓 HEMT 器件的有源区没有绝缘层, 由 γ 射线辐射产生的电荷很快就被复合, 电离损伤只能引起器件的瞬态效应, 对器件特性不会造成永久的损伤。因此, 氮化镓 HEMT 器件有很强的抗 γ 射线辐射能力。但是高能量 γ 射线的电离效应会产生次级粒子, 这些次级粒子同样可以引起材料的位移效应, 产生一定的点缺陷, 进而造成器件电学特性的退化^[2]。

研究表明, 用剂量高达 600 Mrad 的 γ 射线辐射氮化镓器件时, 发现器件的正向栅电流减小, 反向击穿电压显著增加, 阈值电压变得更负, 跨导变化小于 45%, 这是因为 γ 射线辐射引入的深能级陷阱俘获电子, 使得二维电子气沟道中有效载流子密度降低^[3], 此外, 用剂量为 300 Mrad γ 射线辐射时, 器件的直流特性几乎没有变化^[3]; Umana-Membreno 等^[4]利用深能级瞬态谱(Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS)对陷阱进行了测量, 得到了同样的退化机理: 辐射引入的深能级受主缺陷是造成器件参数退化的主要因素; 与此不同, 2003 年 Fan L 等^[5]报道了 γ 射线辐射总剂量为 300 Mrad 时对氮化镓 HEMT 器件特性的影响, 认为辐射后的器件退化主要是由于异质结辐射感生界面态电荷的作用。2004 年 Aktas 等^[6]报道了辐射剂量高达 6 MGy 时, GaN HEMT 器件的跨导增加, 并且阈值电压负向漂移; 2013 年 Schwarz C 等^[7]用剂量为 100~1 000 Gy 的 ⁶⁰Co γ 射线辐射 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管时, 同样发现器件的跨导增加, 同时栅极电流降低; 相比之下, 2009 年 Jha 等^[8]报告了 GaN HEMT 器件接受 100 kGy 的 γ 射线照射后, 器件的跨导降低。2012 年 M Piccione 等^[9]研究了小剂量(4 krad) γ 射线辐射对氮化镓器件的影响, 通过对辐射后器件各电学参数的测量与分析, 以及和其他相关文献的对比研究发现, 区别于高剂量 γ 射线辐射使氮化镓 HEMT 器件性能产生严重退化, 低剂量的 γ 射线辐射可以减少陷阱对氮化镓 HEMT 器件电学特性的影响; 另外, 2015 年 A Yadav 等^[10]研究了低剂量 γ 辐射对少数载流子输运特性的影响, 测量结果表明, 300 Gy 辐射剂量内, 在 AlGaIn/GaN 异质结中少数载流子的扩散长度明显增加, 这是由于 γ 射线辐射材料产生的康普顿电子很可能会产生与氮空位相关的缺陷。2015 年 A Yadav 等^[11]研究了 ⁶⁰Co γ 射线辐射对 N 沟道氮化镓 HEMT 的影响, 通过把电学特性测试和电子束感应电流测量结合起来的方式对其进行了较为全面的研究, 研究表明, 用中低剂量的 γ 射线辐射时, 少数载流子在 AlGaIn/GaN 异质结中的扩散长度增加。此外, 该研究团队将 400~1 000 Gy γ 射线辐射过 GaN 器件在 200 °C 恒温环境下进行 25 min 的退火处理, 发现氮化镓器件的电学特性有明显的恢复。2019 年, zheng 等研究了 γ 射线辐射对氮化镓器件肖特基栅的影响, 发现辐射会减弱栅极对二维电子气的控制: 即使栅极电压远低于阈值, 沟道中也存在二维电子气。2020 年 Sharma Chandan 等^[12]报道了 1 kGy, 6 kGy, 16 kGy γ 射线辐射对氮化镓 HEMT 器件的影响, 经 γ 射线辐射后, 漏极电流增加, 栅电流略微下降, 阈值电压变化很小。通过霍尔测量证实, 漏极电流的增加是由于 γ 射线辐射导致载流子迁移率的增加引起的; 而阈值电压的漂移是由 AlGaIn/GaN 界面陷阱的重新分布引起的。该团队还发现 γ 射线辐射会导致欧姆接触不同金属层之间的相互扩散, 在大于 16 kGy 的 γ 射线辐射下, 肖特基金属接触也表现出相同现象。

从以上文献可以看出, 由于 AlGaIn 和 GaN 材料具有很强的化学键和很高的辐射阈能, 所以一般只有上百 Mrad 的 γ 射线辐射总剂量, 才能引起较多数量的异质结辐射感生界面态和辐射感生深陷阱, 使得氮化镓 HEMT 器件的电学特性发生明显退化; 不同辐射剂量导致器件退化的程度也不一样, 其阈值电压、饱和漏电流、跨导等基本电学特性的变化具有明显的差异性, 甚至出现相反的情况, 比如器件的跨导在辐射剂量相同或相差不大的情况下, 在有的实验中表现出增加, 有的则降低, 这也许和器件的制造工艺、结构、测量方法等有关, 因此导致研究者提出的解释其退化的机理也会有所差异。除了负面影响外, 低剂量的 γ 射线辐射, 可以改善氮化镓界面和材料性能, 减少陷阱对氮化镓 HEMT 器件的影响, 主要表现为漏电流增加, 栅电流减小, 阈值电压变化很

小,其中栅极电流无论在较大剂量辐射时还是小剂量辐射,都表现出过栅电流减小,这是因为 γ 射线辐射改善了氮化镓界面和材料性能,陷阱或缺陷局部退火,隧穿程度降低,从而导致栅极电流下降。此外, γ 射线辐射也会对器件的电极和电极接触产生影响。在较高剂量的 γ 射线辐射下,器件的欧姆接触电极、肖特基接触电极的不同金属层之间会相互扩散,其中肖特基接触电极金属层发生相互扩散的辐射剂量阈值比欧姆接触电极的高;肖特基栅的退化,会减弱其对二维电子气的控制,使得栅极电压小于阈值电压时,器件沟道仍会处于开启状态,这是很危险的一种退化,但是关于这方面的研究,几乎寥寥无几;更有研究表明, γ 射线会与栅极金属相互作用产生较大数量的电子/空穴对,电子会在大电场的作用下从栅极隧穿到栅漏间的表面态,导致负电荷在表面聚集,导带升高,串联电阻增加。虽然关于氮化镓 HEMT 器件 γ 射线辐射的研究愈来愈多,不同研究者关于其电学特性退化的具体表现也有了详尽的描述,但众多研究实验中器件退化表现各有不同,导致研究者提出的退化机理在有些方面也有所差异。

1.2 电子辐射

电子辐射时,在 AlGaIn 和 GaN 材料中入射电子与原子相互作用,发生电离或弹性碰撞,当电子能量较小时,发生的主要是非电离辐射,当入射电子能量较大时,发生位移损伤的可能性降低,辐射效应主要表现为激发与电离。

电离会产生电子空穴对,其中电子会因自身的高电子迁移率和 AlGaIn 内固有电场,被栅极移走;而空穴除了与电子发生复合被消耗掉一部分外,剩余空穴则保持相对不动,向异质结界面缓慢漂移。电子辐射产生的点空穴缺陷不能动,分布于整个铝镓氮层,最终成为正电荷俘获陷阱中心,而电离产生的空穴会被这些陷阱中心俘获,继而成为了固定的正电荷。这部分正电荷产生附加的电场,将会加深量子阱导带断续,造成二维电子气沟道载流子浓度升高,使得夹断电流和漏极电流变大,并且还会致使阈值电压变小。

电子辐射除了电离效应外,还会与晶格原子发生弹性碰撞。辐射电子进入铝镓氮和氮化镓材料,和材料的晶格原子发生弹性碰撞,并损失大量能量;晶格原子会在这一过程吸收能量,挣脱原有的束缚,从而离开它的本征位置,形成间隙原子。离开本征位的原子会在原位留下一个空位,这个空位可以和其他空位与相邻原子分别结合。此外,空位还可以移动到杂质的周围,与它附近的杂质原子结合,从而形成空位杂质复合体电子。对于材料,原子结合能一般是固有的,镓原子束缚小于氮原子,碰撞过程传递能量主要和晶格原子的质量有关^[13]。不同能量的辐射电子与氮化镓晶格原子发生非电离碰撞时传递给晶格原子的最大能量,具体结果如图 1 所示。由于镓原子质量比氮原子大很多,因此,入射电子在发生碰撞时,把大多数能量传递给了氮原子。从图 1 可知,当辐射电子的能量达到 0.15 MeV 时,就会引起氮原子位移;当辐射电子的能量达到 0.5 MeV 时,引起镓原子位移;当辐射电子能量小于等于 0.45 MeV 时,只能产生氮原子的位移;当辐射电子能量小于等于 0.87 MeV 时,氮位移缺陷的产生率总是高于镓位移缺陷的产生率^[13-14]。故不同能量的电子辐射会产生不一样的位移缺陷,也会导致各类位移缺陷的产生率和各类位移缺陷的浓度不同。

研究人员对氮化镓 HEMT 器件做了很多电子辐射实验,以探究电子辐射对氮化镓器件的影响。一些研究报告了不同能量的电子辐照对 GaN 材料^[15-16]和器件^[17-18]的影响。2011 年罗尹虹等^[14]开展了 0.8 MeV 和 1.2 MeV 的电子辐射实验,结果表明,电子辐射使得氮化镓 HEMT 器件的饱和漏电流增加,夹断电流变大,阈值电压减小,跨导降低。此外,还发现电子辐射能量为 0.8 MeV 时器件的退化程度高于电子辐射能量为 1.2 MeV 时。对辐射损伤退化机理分析后认为,电离辐射在铝镓氮层中产生的俘获正电荷与氮化镓层中非电离辐射产生的镓、氮空位,造成了器件的阈值电压变小和漏端饱和电流增大;电子的非电离辐射在铝镓氮势垒层产生的俘获正电荷与电子陷阱是导致栅电流增加的主要原因。2013 年 Chen 等^[19]研究发现氮化镓 HEMT 器件的饱和漏电流在 1.8 MeV 电子辐照后显著改善。同年 Oh S K 等^[20]报道了某一功率的电子辐射,可以改善在蓝宝石衬底生长的 N 型氮化镓、铝镓氮、AlGaIn/GaN 的电学特性,使栅电流减小了约一个数量级。2014 年 Duc T T 等^[21]对电子辐照后 GaN 材料和器件中的缺陷进行了研究,通过测量器件特性的变化和使用深能级瞬态光谱研究了电子辐照在 GaN 缓冲层中诱导的缺陷。2018 年 Sasaki H 等^[22]观察到,在 2 MeV 电子辐照期间, GaN 层中产生的位错导致 HEMT 的载流子密度或迁移率降低。2021 年 Pan 等^[23]系统地研究了高能(1 MeV)电子辐射对氮化镓 HEMT 器件电学特性的影响,当辐

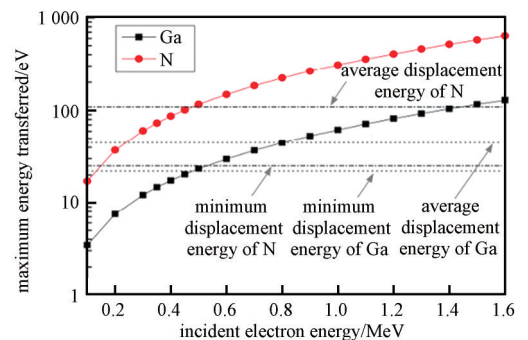


Fig.1 Maximum energy transfer for Ga and N as a function of the incident electron energy^[14]

图1 不同能量电子传递给Ga和N晶格原子最大能量^[14]

射通量从 $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 增加到 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 时, 漏源电流增加, 阈值电压向负方向移动。

总的来说, 电子辐射既能产生电离辐射, 也可以产生非电离辐射, 这与辐射电子的能量有关。在 AlGaIn 层, 电子的非电离辐射导致出现间隙原子, 从而产生深电子陷阱。这些产生的陷阱会大大增加电子隧穿的概率, 也就是加强了辅助隧穿效应。辐射以后, 电子吸收能量穿过势垒, 发生隧道效应, 最终与陷阱复合, 这等于减小了肖特基势垒的高度, 会使得氮化镓器件的栅极泄露电流变大, 这种陷阱辅助隧穿(Trap-Assisted Tunneling, TAT)效应是造成栅电流升高的直接原因; 电离辐射在铝镓氮层中产生的俘获正电荷与氮化镓层中非电离辐射产生的镓、氮空位, 造成了器件的阈值电压变小和漏端饱和电流增大。不同能量的电子辐射对器件影响有所差异, 除了对器件电学性能造成退化外, 较多的文献表明, 特定能量的电子辐射可以减少陷阱, 降低栅电流, 增加漏电流等, 较好地改善器件的电学性能。电子辐照对器件的影响可能对器件结构、电子能量和辐照通量敏感, 这可能是不同报告之间存在差异的原因。目前, 大量的研究只是对电子辐射在氮化镓 HEMT 器件中产生现象进行了表述, 并对产生的现象进行了浅显解释, 很少提及其内在机理。故而, 仍有许多问题需要解决, 例如, 很少有研究详细分析电子辐照后 HEMT 陷阱效应的变化; 对辐照器件中缺陷产生或复合的理解不完善; 对于电子辐照后 HEMT 中的电特性与陷阱效应的相关性, 人们几乎没有进行研究; 这些方面的研究有助于表征电子辐照后器件的性能和相关机制。事实上, 电子辐照是最常见的辐照类型之一, 尤其是在低地球轨道区域, 因此, 应该更加努力地研究电子辐照对 GaN 器件的影响。

1.3 质子辐射

质子带正电荷, 质量比电子大, 但速度比电子小, 当它与物质碰撞时, 是通过库仑力与物质作用。质子辐射既可以产生电离效应, 也可以与晶格原子碰撞产生位移损伤。对于氮化镓 HEMT 器件, 质子辐射对器件产生的影响主要为位移损伤, 当只有单个原子发生位移, 就会形成点缺陷, 这是质子辐射产生的主要缺陷类型。在氮化镓能带结构中, 点缺陷表现为陷阱, 这些陷阱在能带中的位置不同, 所产生的效果也会不同。禁带中心附近的深能级为复合中心, 在这个复合中心电子空穴对发生复合, 导致载流子减少, 也称这种现象为载流子去除效应。在价带顶导带底的附近的浅能级陷阱, 会与能带交换空穴和电子。

研究表明, 能量为 1.8 MeV 的大通量质子辐射氮化镓 HEMT 器件后, 器件的饱和漏电流降低, 导通电阻增加, 阈值电压漂移^[24-30]。2004 年 Hu 等^[31]报道了低通量质子在能量为 1.8, 15, 40 MeV 下的辐射, 发现质子能量为 1.8 MeV 下, 器件退化最严重。其中饱和漏电流降低 10%, 最大跨导降低 6%, 这是由于质子辐射使得陷阱俘获电子后, 器件沟道载流子浓度下降。2015 年 Patrick E E 等^[32]研究了高能量高通量质子辐射对氮化镓 HEMT 器件的影响。研究表明质子能量为 0.5 MeV 和 5 MeV 时, 最大漏电流、跨导、阈值电压出现了不同程度的退化, 栅极电流也有所下降, 这主要是由于质子辐射使得 2DEG 通道附近产生了位移损伤。其中质子能量为 0.5 MeV 时器件的退化程度大于质子能量为 5 MeV 时, 这说明质子能量越低, 缺陷产生的概率越大, 这些缺陷可以存在于 AlGaIn 势垒层、GaN 缓冲层或 AlGaIn/GaN 界面中, 在 2DEG 通道中起到去除载流子的作用。但能量为 60 MeV 的质子辐射氮化镓 HEMT 器件, 最大漏极电流和跨导却几乎没有变化, 阈值电压负漂; 与之前报道的结果相比, 0.5 MeV 和 5 MeV 辐照的 HEMT 在直流特性上表现出相似的变化趋势, 而 60 MeV 辐照的 HEMT 在阈值电压偏移上表现出相反的趋势。2016 年 Wan 等^[33]在不同的偏压条件下, 用低能质子辐照商业增强型 GaN HEMT, 观察到阈值电压(U_{th})漂移。辐照前后 $I-U$ 和 $C-U$ 结果均表明, 低能质子辐照在这些器件中引入了带电施主陷阱; 这些缺陷捕获电子、散射电荷载流子或在器件中部分补偿 p-GaN 层中的 p 型掺杂, 从而导致观察到的 U_{th} 漂移和 G_m 退化。2019 年 A Stockman 等^[34]用 3 MeV 质子辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 发现电子辐射可以抑制器件的动态导通电阻。2020 年 Yue S 等^[35]研究了总剂量为 $5.0 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$ 的 3 MeV 质子辐射下 AlGaIn/GaN HEMT 器件的电学特性和低频噪声。在 3 MeV 质子辐照后, 器件的饱和电流降低, 阈值电压正漂, 反向栅泄漏电流显著降低。认为主要的退化机制是沟道中带负电陷阱密度的增加, 消耗了更多的电子并降低了沟道二维电子气中载流子迁移率。2021 年 Kim J G 等^[36]研究了质子辐照对 AlN 缓冲层和常规 GaN 缓冲层的 AlGaIn/GaN HEMT 器件的影响。发现短时间的质子辐照可以改善器件的某些电学特性, 在不降低输出电流和跨导的情况下大大降低关断状态漏电流和栅极泄漏电流。

得益于以上及其他大量研究, 目前对质子辐射引起氮化镓 HEMT 器件产生退化有了较为完整的机理解释。质子辐射会在 AlGaIn/GaN 界面产生缺陷, 表现为界面态。因为氮化镓禁带较宽, 所以会存在很多能级较深的界面态。而这些界面态由于能级较深, 释放电子空穴的时间比较长, 因此在进行测量时, 这些界面态会表现为固定电荷的性质, 研究氮化镓 HEMT 器件的辐射效应时须考虑此种情况。质子辐射引起的位移效应对氮化镓 HEMT 器件产生的主要影响为: 降低了载流子的密度和减小了载流子的迁移率。复合中心的位置会影响载流子

的复合概率，载流子距离复合中心越近，载流子复合概率就越大。所以在 AlGaIn/GaN 结构中只有距离二维电子气很近的复合中心才会使载流子发生复合，因此复合中心对器件载流子的影响有限，若只用复合中心，就很难解释实验中载流子密度明显减小的情况。目前对于此现象的解释为，质子辐射在 AlGaIn 层中引入了缺陷，而这些缺陷中的受主型缺陷会捕获电子带负电，其产生的电场可以抵消一部分自发极化产生的电场，使得极化电荷减少，最终造成二维电子气里的电子浓度变小^[37]。从能带的角度可解释为：质子辐射产生的缺陷使 AlGaIn/GaN 界面的能带结构发生了变化，致使费米能级的位置被抬高。图 2 为 AlGaIn 层中缺陷能级对 2DEG 密度的影响。质子辐射产生的缺陷会降低载流子的迁移率，这主要是因为陷阱捕获空穴或电子后，成为了带电中心，而这些带电中心会与沟道中运动的载流子形成库伦散射，最终使载流子迁移率下降，随着质子辐射注量的增加，载流子的迁移率会明显减小^[38-39]，如图 3 所示。阈值电压变大是因为质子辐射在氮化镓与铝镓氮材料中产生了带负电的受主型陷阱；饱和漏电流减小是因为载流子迁移率和载流子密度一同降低的影响，也与辐射导致金半界面肖特基势垒升高有关；跨导降低是因为载流子迁移率下降造成的。

尽管现有研究对质子辐射后氮化镓 HEMT 器件特性退化的机理有了合理的解释，但是对氮化镓器件退化的定量分析显示，依然存在很多机理问题亟需解决。现有的大多数关于 GaN HEMT 器件质子辐照效应的研究都集中在分析器件性能的变化和辐照诱导陷阱的演化，然而研究质子辐照对 AlGaIn/GaN HEMT 界面陷阱的影响也非常重要；此外，氮化镓 HEMT 器件在太空等实际环境中工作时不仅会遇到复杂的辐照环境，还会受到长期的电应力、热应力，因此还需加强质子辐照、电应力、热应力联合效应对氮化镓 HEMT 器件影响的研究。

1.4 中子辐射

根据能量的不同，中子可以分为热中子、超热中子和快中子。中子与材料的晶格原子发生碰撞，在材料晶格中产生间隙原子和空位，若空位与间隙原子还在库仑力和弹性力的影响范围，就有可能复合；反之，就不会复合，从而导致位移损伤。空位除了可与空位、原子结合外，还可以和杂质结合，减少参与导电杂质的浓度。此外，当辐射中子能量很大时，会使产生的间隙原子也拥有足够的能量，这样的间隙原子与其他晶格原子发生碰撞，同样会造成位移损伤，最终形成大缺陷群。

由于中子不带电，因此中子辐射产生直接电离的概率很小。中子辐射会在半导体材料中产生许多次级粒子，通常这些粒子的质量较重，并且带一定数量的电荷，这样就在器件中产生了较大的电离能量沉积。另外，入射中子还能和原子发生核反应，并产生带电重离子、 γ 光子等，使得材料活化。若出现非弹性中子吸收，氮化镓材料就可能产生中子嬗变掺杂(Neutron Transmutation Doping)，引入氧和锗杂质。

关于中子辐射对氮化镓器件影响的研究开始得相对较晚，早期只有少数的研究^[40-44]，此后随着人们对氮化镓器件中子辐射的重视，这方面的研究也越来越多。2010 年 Zhang 等^[45]研究了中子辐照对 GaN 外延层深能级的影响。2011 年王燕平等^[46]利用原位测试技术，研究了电子辐射的位移损伤效应和电离辐射效应对器件的影响。研究表明，漏端电流、栅泄露电流、阈值电压对质子辐射敏感；分析器件的退化机理后认为，夹断电流增大和阈值电压退化的主要原因是：电离辐射引入的空穴被位移损伤产生的陷阱俘获，形成了固定正电荷，而栅泄露电流变大是由 TAT 效应造成的。2012 年 LYU 等^[47]在中子能量为 1 MeV 以及通量 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 的条件下，开展了氮化镓 HEMT 器件的中子辐射实验，实验结果显示，氮化镓器件的饱和漏电流减小、最大跨导下降、栅极泄露电流明显增大；但对器件的截止频率、最大频率等射频特性影响较小。对 AlGaIn/GaN 异质结进行霍尔测量测试以及电压电容测试后，发现辐射后器件二维电子气的浓度和迁移率下降。2016 年 Berthet F 等^[48]研究了低通量中子辐

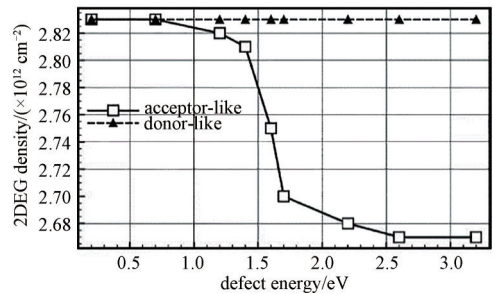


Fig.2 2DEG density as a function of defect energy and defect type in AlGaIn

图 2 AlGaIn 中缺陷类型与能级对二维电子气密度的影响^[37]

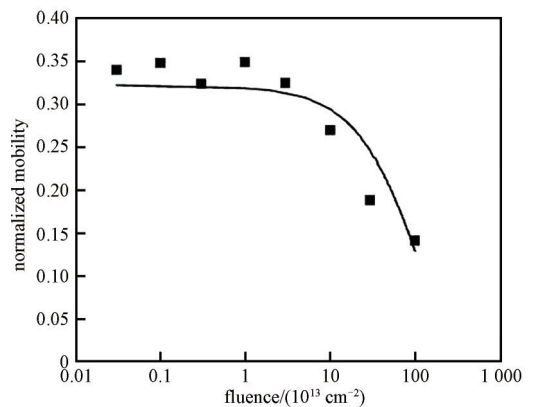


Fig.3 Normalized mobility as a function of proton fluence

图 3 迁移率随质子注量的变化^[38]

照对 AlGaIn/GaN HEMT 器件的影响。快中子辐照通量为 $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 会导致无电应力器件的电性能退化, 而施加了电应力器件辐射后, 发现器件的电学特性有所改善, 因此中子辐射可以减少由电应力引起的缺陷或陷阱。2018 年 Butler P A 等^[49]研究了中子辐射对氮化镓 HEMT 器件开关瞬变过程的影响。研究表明, 中子能量为 14 MeV, 通量大于等于 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时, 辐射会增强陷阱耦合, 导致氮化镓 HEMT 器件开关瞬态的大小与持续时间发生改变; 器件漏电流、二维电子气密度、OFF 到 ON 的转换等, 这些特性随陷阱填充条件的变化而变化, 对于其内在机理还需进一步研究。2019 年 LYU 等^[50]用不同通量的快中子和热中子辐射 AlGaIn/GaN HEMT 器件, 用 14 MeV 中子辐照器件, 器件的电学性能随着中子辐射通量的升高而逐渐退化, 当通量为 $2.12 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ 时, 器件的电学性能明显退化; 认为中子辐射会在 AlGaIn 层引入类受主缺陷, 这会耗尽沟道中的 2DEG, 提高能带, 并使阈值电压漂移为正值, 这种增强势垒可以显著抑制器件的栅肖特基漏电流; 此外热中子辐照后, 肖特基接触的质量显著恶化。2020 年 Ahmed M 等^[51]研究了氮化镓 HEMT 器件, 在受中子辐射时, 给栅极无电应力(器件 1)、加电应力(器件 2)、加电应力且高温退火(器件 3)这三种状态下的电学特性变化。实验表明, 中子辐射栅极加电应力时, 阈值电压发生明显的正向漂移, 其他两种情况几乎没有退化。阈值电压的正偏移是因为在中子辐照过程中, 二次电离产生的电子空穴对在电场加速下, 向相反方向漂移, 由于空穴的迁移率比电子低, 一旦辐射和偏压被去除, 捕获的正电荷最终导致阈值电压的正移。器件 2 的栅泄电流变化明显, 器件 1 和器件 3 的变化不明显, 这是因为电子和中子与 AlGaIn 层中的原子的弹性碰撞可以形成点缺陷造成的; 对于器件 3, 在中子辐射下阈值电压的变化很小, 反映了器件在热应力作用下缺陷的恢复。

随着近年来关于氮化镓 HEMT 器件中子辐射的研究越来越多, 对其发生退化现象的解释也在不断完善。中子辐射在氮化镓 HEMT 器件材料中产生了多种点缺陷和缺陷络合物、异质结界面有陷阱产生, 这使得二维电子气中的载流子迁移率和浓度减小是造成氮化镓 HEMT 器件退化的主要物理机制。其中迁移率减小是因为辐射产生的带电陷阱对载流子有库伦散射作用; 而载流子浓度降低是辐射产生的陷阱能级俘获和缺陷共同影响的结果; 栅极正向与反向电流变大, 是因为中子辐射在铝镓氮层引入的缺陷作为隧穿中心。中子辐射除了造成器件退化外, 还可以减少由电应力引起的缺陷或陷阱, 改善器件的电学性能; 对中子辐射后的器件进行热退火可以使器件实现自恢复。此外, 大多数研究都关于辐射对器件直流特性的影响, 很少考虑辐射前后器件瞬态特性的变化, 这一特性不容忽视, 在认证和评估辐射环境中的电子器件时, 除了直流参数, 还应该研究器件的瞬态特性; 即使很多研究者给出了中子辐射造成氮化镓器件性能退化的解释, 但是关于器件某些性能退化的解释, 大家都是基于自身的实验现象给出可能的机理, 且这些机理并不完善统一; 而且由于器件结构和工艺的不同, 中子辐射造成器件退化的状况也有所差异。

2 结语

氮化镓 HEMT 器件因其优越的性能而被广泛用于太空等具有辐射的环境中, 因此研究氮化镓 HEMT 器件的辐射效应对其在辐射环境中的应用与抗辐射加固意义深远。由于辐射源、辐射剂量、辐射能量等不同, 受辐射后的氮化镓 HEMT 器件, 会出现各种各样的退化现象。本文介绍了 γ 射线辐射、质子辐射、电子辐射、中子辐射对氮化镓 HEMT 器件的影响, 以及氮化镓 HEMT 器件在这些辐射下的退化机理, 并对氮化镓 HEMT 器件在各种辐射下的研究进行了综述。目前, 关于氮化镓 HEMT 器件辐射效应的研究依然任重而道远, 虽然关于氮化镓器件辐射效应的研究有很多, 研究者也都基于实验现象提出了器件辐射效应的退化机理, 但是有些退化机理莫衷一是, 尚未形成统一的、系统的退化理论体系。而且大多数研究都是关于常规性器件的, 对新结构器件辐射效应的研究较少; 此外对于辐射应力、电应力、热应力等多应力协同下对氮化镓 HEMT 器件影响的研究更是寥寥无几。总之, 对于氮化镓 HEMT 器件辐射效应的研究仍需加强。本文内容能够帮助读者了解氮化镓器件的辐射效应, 以及氮化镓器件相关的辐射研究。

参考文献:

- [1] PEARTON S J, HWANG Y S, REN F. Radiation effects in GaN-based High Electron Mobility Transistors[J]. JOM, 2015, 67(7): 1601-1611.
- [2] PEARTON S J, DEIST R, REN F, et al. Review of radiation damage in GaN-based materials and devices[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2013, 31(5): 1-16.
- [3] 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 Letter, 2002, 80(4): 604-606.
- [4] 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.
- [5] FAN L,ZHANG J C,LI P X,et al. Effect of irradiation induced heterointerface state charges on 2DEG transport property in AlGaIn/GaN heterostructures[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2003, 56(8):2555–2572.
- [6] AKTAS O,KULIEV A,KUMAR V,et al. ^{60}Co gamma radiation effects on DC,RF,and pulsed $I-U$ characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Solid State Electronics, 2004,48(3):471–475.
- [7] 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):1150.
- [8] JHA S,JELENKOVIC E V,PEJOVIC M M,et al. Effect of low dose γ -irradiation on DC performance of circular AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. Microelectron, 2009,86(37):1352.
- [9] PICCIONE M,BERTHET F,BOUDART B,et al. Impact of low gamma radiation does on electrical trap related effects in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Electronics Letters, 2012,48(17):1078–1079.
- [10] YADAV Anupama,FLITSYANL Elena,CHERNYAK Leonid,et al. Impact of low dose gamma irradiation on electronic carrier transport in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. MRS Proceedings, 2015,1792(2):mrss15–2137760.
- [11] YADAV A,FLITSYANI E,CHERNYAK L,et al. Low and moderate dose gamma-irradiation and annealing impact on electronic and electrical properties of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Radiation Effects and Defects in Solids, 2015,170(5):1–7.
- [12] SHARMA Chandan,SINGHI Rajendra,CHAO Der Sheng,et al. Effects of γ -ray irradiation on AlGaIn/GaN heterostructures and High Electron Mobility Transistor devices[J]. Journal of Electronic Materials, 2020,49(11):1–9.
- [13] LUO B,JOHNSON J W,REN F. 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.
- [14] 罗尹虹,郭红霞,张科营,等. GaN HEMT 器件电子辐射效应研究[J]. 核技术, 2011,34(7):507–511. (LUO Yinhong,GUO Hongxia,ZHANG Keying,et al. Electron beam irradiation effect on GaN HEMT[J]. Nuclear Techniques, 2011,34(7):507–511.)
- [15] POLYAKOV A Y,PEARTON S J,FRENZAR P,et al. Radiation effects in GaN materials and devices[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2013,1(5):877–887.
- [16] DUC T T,POZINA G,SON N T,et al. Deep levels in As-grown and electron-irradiated n-type GaN studied by deep level transient spectroscopy and minority carrier transient spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2016,119(9):095707-1–7.
- [17] MCCLOREY J W,PETROSKY J C,SATTLER J M,et al. An analysis of the effects of low-energy electron irradiation of AlGaIn/GaN HFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007,54(6):1946–1952.
- [18] PEARTON S J,REN F,PATRICK E,et al. Ionizing radiation damage effects on GaN devices[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2015,5(2):35.
- [19] CHEN C,LIU X Z. Effects of low-energy electron irradiation on enhancement-mode AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. Advanced Materials Research, 2013(774–776):876–880.
- [20] OH S K,SONG C G,JANG T,et al. Effect of electron-beam irradiation on leakage current of AlGaIn/GaN HEMTs on sapphire[J]. Journal of Semiconductor Technology and Science, 2013,13(6):617–621.
- [21] DUC T T,POZINA G,SON N T,et al. Radiation-induced defects in GaN bulk grown by halide vapor phase epitaxy[J]. Applied Physics Letters, 2014,105(10):2.
- [22] 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.
- [23] PAN S,FENG S,LI X,et al. Analysis of the effects of high-energy electron irradiation of GaN High Electron Mobility Transistors using the voltage-transient method[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021,68(8):3968–3973.
- [24] IONASCUT-NEDELCESCU A,CARLONE C,HOUDAYER A,et al. Radiation hardness of gallium nitride[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002,49(6):2733–2738.
- [25] WEAVER B D,MARTIN P A,BOOS J B,et al. Displacement damage effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012,59(6):3077–3080.
- [26] KARMARKAR A P,JUN B,FLEETWOOD D M,et al. Proton irradiation effects on GaN-based high electron-mobility transistors with Si-doped Al/sub x/Ga/sub 1-x/N and thick GaN cap layers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004,51(6):3801–3806.
- [27] HU X,KARKARKAR A P,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.
- [28] SONIA G,BRUNNER F,DENKER A,et al. Proton and heavy ion irradiation effects on AlGaIn/GaN HFET devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(6):3661–3666.

- [29] PUZYREV Y S, ROY T, ZHANG E X, et al. Radiation-induced defect evolution and electrical degradation of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(6):2918–2924.
- [30] KALAVAGUNTA A, SILVESTRI M, BECK M J, et al. Impact of proton irradiation-induced bulk defects on gate-lag in GaN HEMTs[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(6):3192–3195.
- [31] HU X, CHOI B K, BARNABY H J, et al. The energy dependence of proton-induced degradation in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(2):293–297.
- [32] PATRICK E E, GHOUDHURY M, REN F, et al. Simulation of radiation effects in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2015, 4(3):21–25.
- [33] WAN X, BAKER O K, MCCURDY M W, et al. Low energy proton irradiation effects on commercial enhancement mode GaN HEMTs[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 64(1):253–257.
- [34] STOCKMAN A, TAJALLI A, MENEGHINI M, et al. The effect of proton irradiation in suppressing current collapse in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 66(1):372–377.
- [35] YUE S, LEI Z, PENG C, et al. High-fluence proton-induced degradation on AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(7):1339–1344.
- [36] KIM J G, KIM E, KIM D S, et al. Investigation of proton irradiation enhanced device performances in AlGaIn/GaN HEMTs[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2021(10):19–22.
- [37] KARMARKAR A P, JUN Bongim, FLEETWOOD D M, et al. Proton irradiation effects on GaN-based High Electron Mobility Transistors with Si-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ and thick GaN cap layers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(6):3801–3806.
- [38] HU X, CHOI B K, BARNABY H J, et al. The energy dependence of proton-induced degradation in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, 51(2):293–297.
- [39] KIM D S, LEE J H, KIM J G, et al. Anomalous DC characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs depending on proton irradiation energies[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2020, 9(6):065005-1–4.
- [40] WANG R X, XU S J, FUNG S, et al. Micro-Raman and photoluminescence studies of neutron-irradiated gallium nitride epilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(3):031906.
- [41] GAUBAS E, KAZLAUSKAS K, VAITKUS J, et al. Role of radiation defects in photoconductivity transients and photoluminescence spectra of epitaxial GaN layers[J]. *Physica Status Solidi(C)*, 2005, 2(7):2429–2432.
- [42] KURIYAMA K, OOI M, ONOUE A, et al. Thermally stimulated current studies on neutron irradiation induced defects in GaN[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(13):132109.
- [43] POLYAKOV A Y, SMIRNOV N B, GOVORKOV A V, et al. Fast neutron irradiation effects in n-GaN[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2007, 25(2): 436–442.
- [44] ZHANG Minglan, WANG Xiaoliang, XIAO Hongling, et al. Neutron irradiation effect in two-dimensional electron gas of AlGaIn/GaN heterostructures[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(3):1045–1048.
- [45] ZHANG M, WANG X, XIAO H, et al. Influence of neutron irradiation on the deep levels in GaN[C]// 2010 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Shanghai, China: IEEE, 2010:1533–1535.
- [46] 王燕萍, 罗尹虹, 张科营, 等. GaN HEMT 器件中子辐照效应实验研究[J]. *固体电子学研究与进展*, 2011, 31(6):540–544. (WANG Yanping, LUO Yinhong, ZHANG Keying, et al. Experimental study of neutron irradiation effects on GaN HEMT devices[J]. *Research & Progress of SSE*, 2011, 31(6):540–544.)
- [47] LYU L, ZHANG J C, XUE J S, et al. Neutron irradiation effects on AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(3):364–368.
- [48] BERTHET F, PETITDIDIER S, GUHEL Y, et al. Influence of neutron irradiation on electron traps existing in GaN-based transistors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 63(3):1918–1926.
- [49] BUTLER P A, UREN M J, LAMBERT B, et al. Neutron irradiation impact on AlGaIn/GaN HEMT switching transients[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, 65(12):2862–2869.
- [50] LYU Ling, YAN Xiaoyao, CAO Yanrong, et al. Significant degradation of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors with fast and thermal neutron irradiation[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, 66(6):886–891.
- [51] AHMED M, KUCUKGOK B, YANGUAS-GIL A, et al. Neutron radiation hardness testing of 650 V/7.5 A GaN power HEMT[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 166(C):108456.