

文章编号: 2095-4980(2022)09-0922-06

HEMT 器件质子辐射效应仿真

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

(西安电子科技大学 a. 机电工程学院; b. 宽禁带半导体技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要: GaN 基高电子迁移率晶体管(HEMT)器件具有抗高频、耐高温、大功率、抗辐射等特性, 在核反应堆、宇宙探测等辐射环境中具有广阔的应用前景。借助 SRIM 软件仿真 1.8 MeV 质子辐射对不同 AlGa_N 势垒层纵向尺寸下的常规耗尽型器件内部产生空位密度的影响, 并观察空位密度随深度的变化规律。在最优 AlGa_N 势垒层厚度条件下, 通过仿真对比 5 种不同栅氧层材料 MIS-HEMT 器件, 发现氮化铝(AlN)栅氧层材料具有相对较好的抗辐射效果。

关键词: GaN 材料; HEMT 器件; MIS-HEMT 器件; 质子辐射仿真

中图分类号: TN306

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022010

Simulation of proton radiation effect in HEMT devices

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

(a.School of Electronics&Mechanical Engineering; b.State Key Laboratory of Wide Bandgap Semiconductor Technology,
Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: GaN High-Electron-Mobility Transistors(HEMTs) devices bear the characteristics of high frequency resistance, high temperature resistance, high power and radiation resistance, which have broad application prospects in radiation environments such as nuclear reactors, cosmic detection and other radiation environments. Therefore, Stopping and Range of Ions in Matter(SRIM) is employed to simulate the effect of 1.8 MeV proton radiation on the conventional depletion device with different AlGa_N barriers, and to observe the change law of vacancy density with depth. Under the optimal AlGa_N barrier thickness, the MIS-HEMT devices of five different gate oxygen layer materials are simulated and compared. It is found that the material of Aluminum Nitride(AlN) gate oxygen layer bears relatively good radiation resistance.

Keywords: material of GaN; High Electron Mobility Transistor; Metal Insulator Semiconductor-HEMT; proton radiation simulation

随着 GaN 基器件作为关键设备应用于国防和航空航天领域, 器件的可靠性面临来自复杂的辐射环境的巨大挑战。太空辐射源主要包括: a) 范艾伦带; b) 太阳耀斑产生的粒子活动; c) 宇宙射线。其中范艾伦带是围绕在地球周围的环状区, 主要成分为质子。太阳活动时表面会喷发出大量辐射质子, 而其爆发具有随机性, 难以估计其爆发量以及持续时间。同时地面辐射环境也包括大量 γ 射线、X 射线、中子等各种带电离子。

辐射对电子器件的损伤形式各有异同^[1-2], 对于半导体器件, 辐射损伤包括电离损伤和位移损伤, 其粒子入射进入靶材料, 与靶材原子相互作用损失能量, 一种是将入射粒子能量传递给核外电子, 核外电子吸收能量跃迁至更高能级, 使之电离或激发, 这一过程称为电离效应; 另一种是入射粒子将能量传递给靶原子核, 晶格原子获得比位移阈值大的能量, 离开其原有位置, 造成原子移位, 被称为位移损伤。器件的辐射损伤程度由入射粒子的种类、能量、靶材料和辐射损伤模式等因素决定。国内外已发表的文献表明 GaN 材料及其器件具有一定

收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-04-19

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

*通信作者: 曹艳荣 email:yrcao@mail.xidian.edu.cn

的抗辐射性能^[3-5]，但是 GaN 材料特性对工艺要求较高，工艺环节将有可能影响器件的抗辐射性能，使得其优势未能完全体现，因此本文将基于 SRIM 软件进行仿真，研究接近理想情况下 GaN 基 HEMT 器件的抗辐射性能。

SRIM 软件基于 Monte Carlo 方法，是目前通用的计算带电粒子在靶材料中入射和能量传递的计算程序，因此，本文拟采用 SRIM 模拟质子入射和 GaN 材料的交互作用来分析确定 GaN 的质子辐射损伤机制和辐射损伤区，并在不同栅氧层条件下，对 AlGaIn/GaN MIS-HEMT 器件结构进行模拟仿真，研究栅氧层材料对器件抗辐射性能的影响。

1 GaN 材料质子辐射仿真研究

1.1 不同能量质子在 GaN 材料的射程模拟

地球近地轨道的质子积分通量能谱表面其质子能量主要集中在几十 keV 到几 MeV^[4]，研究不同能量质子对 GaN 材料的微观交互作用，确定 GaN 材料的辐射损伤区，通过 SRIM 仿真模块使用能量 E_p 为 1~10 MeV 的质子，模拟不同能量质子在 GaN 材料中的射程 R ，入射粒子在靶材料中的终止位置及其在入射方向上的投影射程可以直观地反映材料的辐射损伤区。模拟结果如图 1(a)所示，可以看出随着质子能量的提高，在 GaN 材料的射程越远，辐射损伤区越深入。在 10~200 keV 能量范围内，质子在 GaN 材料中的平均投影射程与质子能量关系拟合如图 1(b)所示，拟合结果为：

$$R = 40.969 + 5.3528E_p \tag{1}$$

式中 E_p 为入射质子能量。

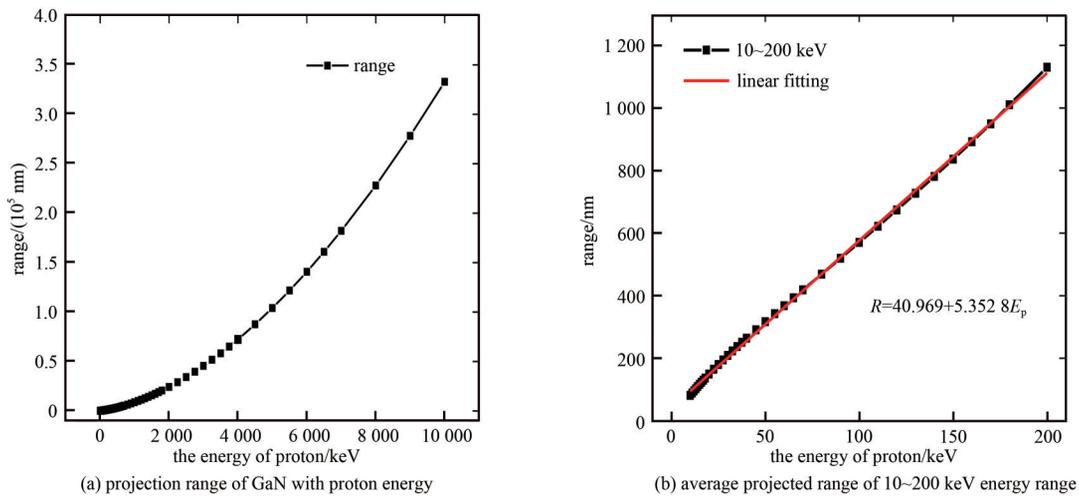


Fig.1 Projection range in GaN under different proton energies

图1 不同质子能量在 GaN 材料中的投影射程

1.2 GaN 材料对质子的阻止本领

GaN 材料在质子辐射过程中，其对入射质子的阻止主要来自 GaN 核外电子与质子之间的交互作用^[5]。为了进一步分析 GaN 辐射损伤类型，分别计算 GaN 材料的阻止本领。GaN 材料的阻止本领可以由入射质子在单位路径上的能量损失(-dE/dx)进行描述，反映出原子核和核外电子对质子辐射的阻止能力。

从图 2 可以看出，GaN 材料的电子阻止本领反映了质子与 GaN 晶格原子核外电子碰撞时引发的非弹性能量损失，GaN 电子阻止本领在 15~200 eV/nm 范围内。可以看出，其电子阻止本领随着质子能量增加先显著增加(在 90 keV 质子能量条件下达到最大值 184.4 eV/nm)，再逐渐减小。对于 GaN 材料的核阻止能力，从图中可以看出其小于 3.7 eV/nm，并且随着质子能量的增加而逐渐下降。

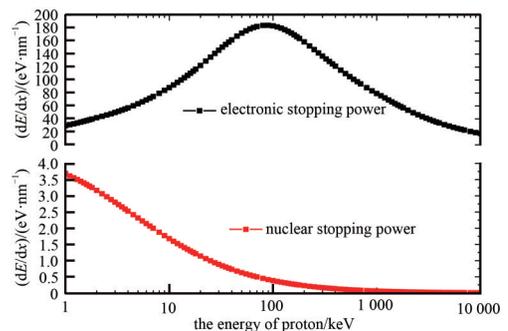


Fig.2 Electronic and nuclear stopping power of GaN

图2 GaN 材料电子阻止和核阻止能力

对速度远远超过玻尔速度(2.2×10^6 m/s)的带电粒子，核阻止本领是电子阻止本领的千分之几，对于能量为 10 keV 的质子，核阻止的贡献约占总能量损失的 1%~2%，随着质子能量的提高，GaN 材料中电离效应逐渐代替位移效应，入射质子与 GaN 晶格原子的核外电子之间的非弹性碰撞是质子能量损失的主要方式。

1.3 质子在弹性碰撞中传递给 Ga、N 原子的能量

质子辐射下，辐射损伤来源于质子和 GaN 交互作用，即入射质子在沿其运行路径上把能量传递给晶格中的 Ga、N 原子，而其自身却随着能量的衰减速度逐渐减小而慢化，直至最后损失全部能量而停留在靶材料中。从辐射效应来看，主要有电离和位移 2 种形式^[6]：

电离是指入射质子与 GaN 的核外电子发生非弹性碰撞而使电子脱离原子核束缚成为自由电子的过程，其辐射损伤主要表现为在 GaN 材料中引入过剩的空穴和电子密度。

位移是指入射质子与 GaN 的原子核发生碰撞而使 Ga、N 原子脱离原有位置的过程，其辐射损伤表现为在 GaN 中产生空位、间隙原子、弗伦克尔对、双空位或空位/杂质原子对等。质子辐射下，GaN 的辐射损伤是以电离效应为主还是位移效应为主，均与质子传递给 GaN 晶格原子的能量有关，只有传递能量大于 Ga、N 原子的位移阈值能时，才能产生位移损伤^[7]。

通过能量守恒和动量守恒定律，可以求得质子传递给晶格原子的能量为：

$$E_t = \frac{4M_p M_t}{(M_p + M_t)^2} E_p \cos^2 \varphi \quad (2)$$

式中： φ 为靶原子的反冲角； M_p 为入射质子质量； M_t 为靶原子质量； $M_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, $M_{Ga} = 1.16 \times 10^{-25}$ kg, $M_{Al} = 2.99 \times 10^{-26}$ kg, $M_N = 2.33 \times 10^{-26}$ kg。当 $\varphi = 0$ 时， $E_t = E_{t,max} = \alpha E_p$ ，即 $\varphi = 0$ 时，质子在弹性碰撞中传递给 Al、Ga、N，最大能量分别为 $E_{t,max}(Al)$ 、 $E_{t,max}(Ga)$ 、 $E_{t,max}(N)$ 。

从图 3 可看出，随着入射质子能量的增加，质子传递给晶格原子的能量呈增加趋势；从图中还可看出，由于靶原子质量不同，其最大能量 $E_{t,max}(N) > E_{t,max}(Al) > E_{t,max}(Ga)$ 。同时，原子的位移阈能是衡量其能否发生位移的重要依据，对于 Ga、N 原子的位移阈能，有学者^[8]通过实验测得 $E_d(Ga)$ 和 $E_d(N)$ 分别为 73.2 eV 和 32.4 eV，并提出沿着 GaN 材料晶相 <1010> 方向，位移阈能存在最小值 $E_d(Ga) \approx 39$ eV, $E_d(N) \approx 17$ eV。因此，当入射质子能量大于 1 MeV 时，质子传递给 Al、Ga、N 原子的能量远大于位移阈能，引入位移损伤。

2 HEMT 器件质子辐射仿真研究

在计算能量传递和损失以及确定辐射损伤机制和损伤区，SRIM 中的 TRIM 模块可以深入分析器件内部辐射产生的缺陷种类和数量^[9-10]，因此，本节拟采用 SRIM 软件来仿真 GaN HEMT 结构，为保证仿真速度并确保足够小的误差，本文计算采用 10^5 个粒子，采用全级联损伤计算模式(Detailed Calculation with Full Damage Cascades, DCFDC)模拟质子对器件的辐射损伤，由于 GaN 材料抗辐射性能优异，而在近地轨道附近最大质子能量达到几 MeV，因此选取质子能量为 1.8 MeV，质子与器件入射角度 0° 的辐射情况。同时，由于在 AlGaIn/GaN HEMT 器件中，异质结界面的 2DEG 是影响器件特性的主要因素^[11-13]，因此在仿真中主要考虑异质结界面附近的缺陷中心。根据一定能量的质子在材料一定深度内产生的空位数，可以计算出不同辐射剂量下在一定深度的空位密度。如在 1.8 MeV 质子辐射下，在靠近异质结一侧 AlGaIn 中的 Ga 空位为 7.35×10^{-6} n/Å ion，当质子注量为 5×10^{11} cm⁻² 时，得出此剂量下 Ga 空位密度为 $7.35 \times 10^{-6} \times 10^8 \times 5 \times 10^{11} = 3.675 \times 10^{14}$ cm⁻³。

2.1 不同厚度 AlGaIn 层的辐射仿真

常规耗尽型 HEMT 器件势垒层的厚度 H_{AlGaIn} 一般在 10~50 nm 范围内，为研究器件纵向尺寸的改变对器件质子辐射的影响，采用仿真结构如图 4 所示，本节将以 5 nm 为间隔，参考文章中的典型质子能量^[13-14]通过仿真研究不同 AlGaIn 层厚度的器件在能量为 1.8 MeV、注量为 5×10^{11} cm⁻² 的质子辐射后 AlGaIn/GaN 异质结界面附近空位密度的变化情况，对于其他能量的质子辐射也可通过类似方法，通过预测相应的离子射程，分析器件中的辐射损伤区。

从图 5 中可以看出，不同 AlGaIn 厚度下，势垒层内在靠近沟道处的空位密度基本保持不变，但总体呈现增大趋势，而缓冲层靠近沟道处的总空位密度没有什么明显规律。可以发现，当势垒层厚度为 25 nm 时，势垒层与缓冲层靠近沟道处具有最小的总空位密度 1.98×10^{15} cm⁻³，因此对于常规耗尽型 HEMT 器件，AlGaIn 层厚度设定在 25 nm 附近具有最少空位缺陷，即器件具有更好的抗辐射能力。

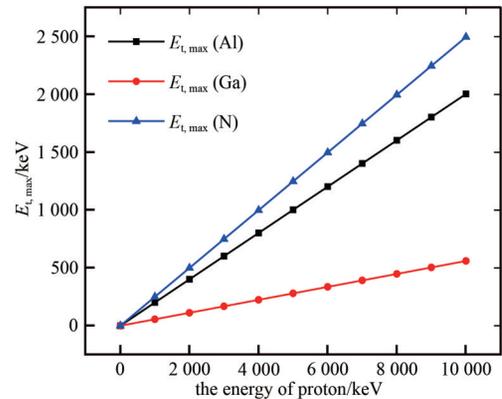


Fig.3 Maximum energy transferred from incident protons with different energies to Al, Ga and N atoms

图3 不同能量的入射质子传递给 Al、Ga、N 原子的最大能量

当 AlGaIn 层为 25 nm 时，设定质子能量为 1.8 MeV，注量为 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ，辐射后 AlGaIn 和 GaN 层空位密度随深度 Depth 的变化情况如图 6 所示，可以看出，在 AlGaIn 势垒层内其各原子空位随深度变化没有表现出规律性，其中 Al 空位在 22 nm 处具有最大空穴密度，Ga 空位在 24 nm 处具有最大空穴密度，N 空位在 11 nm 处具有最大空穴密度。GaN 缓冲层内各原子空穴密度整体呈现增大趋势，说明辐射产生的空位更集中在缓冲层底部，即质子辐射在器件内的射程越大，辐射损伤区越深。其中 Ga、N 空位均在 860 nm 处具有最大空穴密度。

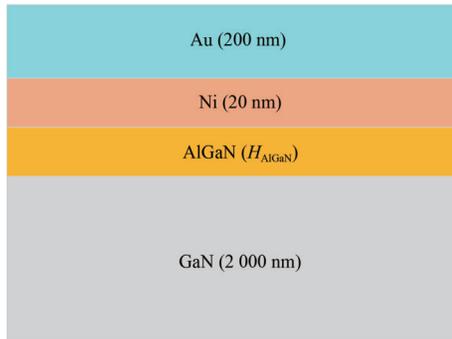


Fig.4 Size diagram of simulation model
图4 仿真模型尺寸示意图

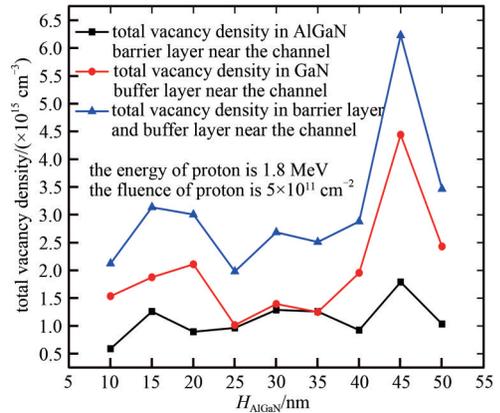


Fig.5 Vacancy density near the channel of HEMT device changing with the thickness of AlGaIn barrier layer after radiation
图5 辐射后 HEMT 器件靠近沟道处空位密度随 AlGaIn 势垒层厚度变化

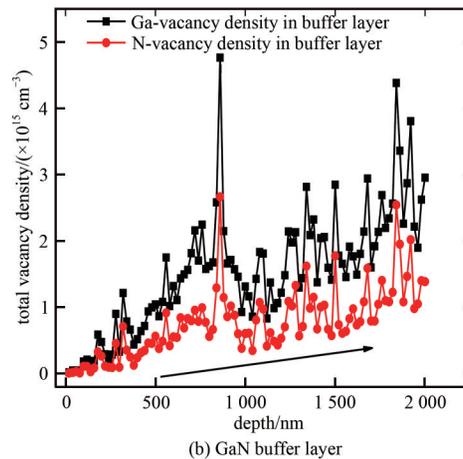
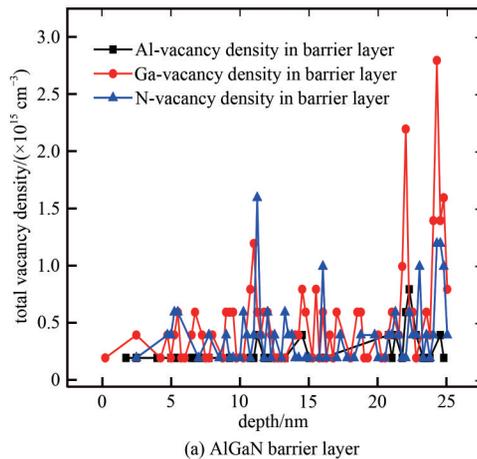


Fig.6 Variation of vacancy density in each layer with depth after radiation
图6 辐射后各层空位密度随深度变化

2.2 MIS-HEMT 器件的质子辐射仿真

在前人的实验和仿真结果的基础上^[15-16]，得知在质子条件下，MIS-HEMT 器件相比于常规 HEMT 器件抗辐射特性具有一定改善作用，质子辐射后具有更低的界面态密度。而产生这种优势的原因得益于 MIS-HEMT 结构中栅氧层对质子的阻挡作用，本节将采用一些常用的栅氧层材料包括 $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Si}_3\text{N}_4, \text{HfO}_2, \text{AlN}$ 钝化材料，探究不同钝化材料下器件的抗辐射能力。为方便进行对比分析，设定 HEMT 结构与 2.1 节一致，势垒层厚度为 25 nm，栅氧层厚度为 20 nm，质子能量为 1.8 MeV。表 1 为质子能量为 1.8 MeV，注量为 $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 条件下，不同栅氧层条件下栅氧层、靠近沟道处势垒层和缓冲层的总空位数，可以看出栅氧层对 GaN 材料的抗辐射性能具有一定改善作用。

从表 1 可以看出，5 种常规栅氧层中元素的空位密度随着辐射注量的增加而线性增加，各栅氧层内总空位密度关系表现为 $\text{HfO}_2 > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{AlN}$ ，但其栅氧层内总空位密度均在同一数量级，没有明显区别。可以看出在 AlGaIn 层靠近沟道处，不同栅氧层条件下，产生 Al,Ga,N 总空位密度的关系为 $\text{HfO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{SiO}_2 > \text{AlN}$ ；在 GaN 层靠近沟道处，不同栅氧层条件下，产生 Ga,N 总空位密度的关系为 $\text{HfO}_2 > \text{SiO}_2 > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{AlN}$ ；在 AlGaIn 层和 GaN 层靠近沟道处，不同栅氧层条件下，总空位密度的关系为 $\text{HfO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Si}_3\text{N}_4 > \text{SiO}_2 > \text{AlN}$ ；因此可

以看出采用 AlN 材料作为栅氧层材料在质子辐射下靠近沟道处产生的空位密度相对较小,在一定程度上可以提高器件的抗辐射能力。

表 1 不同栅氧层条件下势垒层和缓冲层的总空位密度(单位: cm^{-3})

Table1 Total vacancy density in barrier layer and buffer layer under different oxide layers(unit: cm^{-3})

oxide layer	vacancy density in oxide layer	vacancy density in AlGaIn layer near the channel	vacancy density in GaN layer near the channel	total vacancy density
none	—	1.640×10^{15}	3.050×10^{14}	1.945×10^{15}
SiO_2	1.475×10^{15}	1.435×10^{15}	2.000×10^{14}	1.635×10^{15}
Al_2O_3	1.328×10^{15}	1.750×10^{15}	1.000×10^{14}	1.850×10^{15}
Si_3N_4	1.723×10^{15}	1.575×10^{15}	1.700×10^{14}	1.745×10^{15}
HfO_2	2.205×10^{15}	2.025×10^{15}	4.700×10^{14}	2.495×10^{15}
AlN	1.080×10^{15}	1.175×10^{15}	5.000×10^{13}	1.225×10^{15}

3 结论

本文借助 SRIM 软件仿真质子辐射对不同 AlGaIn 势垒层纵向尺寸下的常规耗尽型器件内部产生空位密度的影响,发现当势垒层厚度在 25 nm 附近时,1.8 MeV 质子辐射后,靠近沟道处的空位密度较小。在最优 AlGaIn 势垒层厚度条件下,通过对比 6 种不同材料对器件的栅氧层处理,AlN 栅氧层材料具有相对较好的抗辐射效果。

参考文献:

- [1] MENEGHESSO G, VERZELLESI G, DANESIN F, et al. Reliability of GaN high-electron-mobility transistors: state of the art and perspectives[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2008, 8(2): 332–343.
- [2] KHAN M A, KUZNIA J N, OLSON D T, et al. Microwave performance of a 0.25 μm gate AlGaIn/GaN heterostructure field effect transistor[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(9): 1121–1123.
- [3] ANDERSON T J, KOEHLER A, GREENLEE 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.
- [4] HUANG Bencheng, TONG Jingyu. Space environment engineering[M]. Beijing: Press of Technology of Science and Technology of China, 2010.
- [5] ZHANG Minglan, YANG Ruixia, LI Zhuoxin, et al. Study on proton irradiation induced defects in GaN thick film[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 62(11): 117103–117109.
- [6] RESHCHIKOV M A, MORKOC H. Luminescence properties of defects in GaN[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(6): 061301-1–95.
- [7] MANASREH M O, WEAVER B D. Local vibrational modes of carbon–hydrogen complexes in proton irradiated AlGaIn[J]. MRS Online Proceedings Library, 2001(692): H911.
- [8] XIAO H Y, GAO F, ZU X T, et al. Threshold displacement energy in GaN: Ab initio molecular dynamics study[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(12): 334–338.
- [9] ZIEGLER J F. The stopping and range of ions in matter[J]. Springer US, 2012(268): 1818–1823.
- [10] QADR H M, HAMAD A M. Using of stopping and range of ions in matter code to study of radiation damage in materials[J]. Solid State Physics, 2020, 12(4): 451–456.
- [11] LYU Ling, LIN Zhengzhao, GUO Hongxia, et al. Effect of proton irradiation on enhancement–mode AlGaIn/GaN MIS–HEMTs[J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(2): 1–7.
- [12] YAN Xiaoyao. The study of radiation traps in AlGaIn/GaN HEMTs[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2020.
- [13] XI Yuyin, HSIEH Y L, HWING Y H, et al. Effect of 5 MeV proton radiation on DC performance and reliability of circular–shaped AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2013, 32(1): 012101–012102.
- [14] LYU Ling. Study of radiation effects of GaN-based semiconductor materials and HEMTs[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.
- [15] GU Wenping, CHEN Chi, DUAN Huantao, et al. ^{60}Co γ -rays irradiation effect in DC performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors[J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(4): 25–29.
- [16] CHANG S J, JUNG H W, CHO K J, et al. Impact of passivation system on device performance and proton radiation hardness in GaN-based MIS–HEMTs[J]. ECS Transactions, 2020, 98(5): 519–526.