

氧化镓中子辐照损伤模拟研究

罗智, 刘洋*

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年4月16日; 录用日期: 2024年5月6日; 发布日期: 2024年7月30日

摘要

氧化镓(Ga_2O_3)材料作为代表性的超宽禁带半导体材料之一,具有宽带隙、高击穿电场等优异的物理性能,在深空探测的器件中具有广阔的应用前景。为了研究和揭示深空环境下 Ga_2O_3 材料的辐射损伤对探测器性能的影响,本文利用Geant4模拟研究了不同能量中子辐照 Ga_2O_3 材料产生的辐射损伤效应,包括位移损伤和电离损伤。结果表明: Ga_2O_3 中中子产生的反冲原子能量主要在低能区,全部发生小角度散射;对于中子辐照产生的二次粒子,发生非弹性散射和裂变反应时能量损失大,中子有显著的核反应;中子在 Ga_2O_3 材料中输运时,还会产生一定数量的次级质子、伽马粒子、中子及alpha粒子,都会对 Ga_2O_3 材料造成电离损伤和位移损伤。模拟结果为中子辐照环境下 Ga_2O_3 材料的实验研究提供理论指导,对 Ga_2O_3 材料应用于深空探测具有参考价值。

关键词

氧化镓, 中子辐照, 辐照损伤, Geant4

Simulation Study of Neutron Irradiation Damage in Gallium Oxide

Zhi Luo, Yang Liu*

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Apr. 16th, 2024; accepted: May 6th, 2024; published: Jul. 30th, 2024

Abstract

Gallium oxide (Ga_2O_3) material is one of the representative ultra-wideband semiconductor materials, with wide bandgap, high breakdown electric field, and other excellent physical properties, and has a broad application prospect in the device of deep space exploration. To study and reveal

*通讯作者。

the effect of radiation damage on the detector performance of Ga_2O_3 material in the deep space environment, this paper uses Geant4 simulation to study the radiation damage effects produced by different energies of neutron irradiation of Ga_2O_3 material, including displacement damage and ionization damage. The results show that the recoil atomic energy generated by neutrons in Ga_2O_3 is mainly in the low-energy region, and all of them are scattered at a small angle; For secondary particles produced by neutron irradiation, inelastic scattering and fission reactions occur with large energy losses, and neutrons have significant nuclear reactions; when the neutrons are transported in Ga_2O_3 material, a certain number of secondary protons, gamma particles, neutrons, and alpha particles are generated, which will cause ionization damage to the Ga_2O_3 material. Ga_2O_3 material, all of which cause ionization damage and displacement damage. The simulation results provide theoretical guidance for the experimental study of Ga_2O_3 materials under a neutron irradiation environment, which is of reference value for the application of Ga_2O_3 materials in deep space exploration.

Keywords

Gallium Oxide, Neutron Irradiation, Irradiation Damage, Geant4

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类对空间探索的不断拓展,在空间上逐渐广泛地应用大规模和超大规模的集合电子芯片和器件。也正因如此,航天电子信息系统所受到的空间环境影响也变得更加不容忽视。作为代表性的宽禁带半导体材料之一,氧化镓(Ga_2O_3)材料具有宽带隙(4.4~5.3 eV)、高击穿电场(8 MV/cm)和强键合特性[1]-[3]等优异的物理性能,在大功率电子器件中具有广阔的应用前景[4]-[6]。同时,由于Ga和O原子[7][8]的位移能更高,一般认为 Ga_2O_3 基器件比Si和GaAs基器件具有更强的理论耐辐射能力。这使得基于 Ga_2O_3 的器件在航空航天应用中具有很大的潜力。一般来说,当电子设备应用在太空环境中时,它们会暴露在高能粒子流中[9][10]。先前的研究表明,尽管 Ga_2O_3 材料因为独特的性质,使其具有良好的理论抗辐射能力[11][12],能够在恶劣的环境下工作,但在辐射环境中仍会退化。目前 Ga_2O_3 在辐照环境下的结构演变受到了学术界广泛关注。对 Ga_2O_3 材料辐照后的缺陷行为及性能影响进行研究有着重要的实用意义。

中子是各种空间辐射粒子中穿透性最强的粒子,它能轻易穿透包装材料,对电子设备造成辐射损伤。此外,地面上的电子设备也会被宇宙射线产生的中子损坏[13]。因此,中子辐射相关的电子设备退化是一个严重问题。

中子作为典型的电中性重粒子,通过原子碰撞和电离两种机制将能量沉积在 Ga_2O_3 中,分别产生位移损伤和电离损伤。在这些电中性粒子的作用下, Ga_2O_3 的性能可能会受到电离或位移损伤的影响。 Ga_2O_3 对中子引起的电离和位移效应都很敏感。此前相关的研究主要是集中在单能中子辐照 Ga_2O_3 材料产生的影响[14]-[16]。但是由于此类研究结果并不能直接反映出中子辐照所致位移损伤的数量和分布,只能间接的反映材料性能参数等比较宏观的参数的变化,并且对于初级撞击原子和其他二次粒子,如 γ 、质子、 α 和中子的空间分布、散射角和能谱的研究尚未得到重视,而且研究采用的方法比较粗糙,因此并不能彻底解决微观上根本性的问题。另外实际上由于地面试验的复杂性,并不能完全等效真实辐照环境下的空间环境。然而,随着高性能计算机的发展,通过高性能模拟软件模拟高能粒子与材料的相互作用过程,

能够更微观的研究粒子产生的位移损失, 系统的分析产生位移原子的数量和空间分布。因此, 本文采用基于蒙特卡洛方法的 Geant4 模拟软件, 本文重点研究了不同能量的中子对 Ga_2O_3 产生的辐射损伤, 为探究如何提升 Ga_2O_3 材料的抗辐照性能奠定理论基础。

2. 中子辐照损伤原理

当中子进入到 Ga_2O_3 材料内部时, 将会与晶格上的原子发生相互作用, 并将所携带的一部分能量转移到该原子。这种与高能入射粒子发生碰撞作用而被反冲的原子被称为初级碰撞原子, 简称 PKA (Primary knock-on atom), 那些带具有了足够的能量, 从而可以克服周围的束缚作用而最终离开原来位置的原子, 被称作初级离位原子。如果这些初级离位原子的能量大于晶格原子的离位阈能, 其会继续与晶格原子发生碰撞, 所产生的离位原子被称为次级碰撞原子[17]。当反冲原子在 Ga_2O_3 材料中输运时, 会产生非电离损失。

中子在 Ga_2O_3 材料中产生的非电离能损失包括弹性能量损失、非弹性能量损失、库伦能量损失, 其表达式如(1)所示:

$$NIEL(T_0) = \frac{N_A}{A} \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} Q(T) \left(\frac{d\sigma}{dT} \right)_{T_0} dT \quad (1)$$

其中, N_A 是阿伏伽德罗常数, A 是物质的原子序数, T_{\max} 和 T_{\min} 是位移原子的最大能量和最小能量, $d\sigma/dT$ 是位移损伤的微分截面。 $Q(T)$ 是位错原子的能量函数。其表示位移原子的非弹性碰撞和弹性碰撞造成的能量损失和位移原子的非弹性碰撞和弹性碰撞。在模拟中, 通常采用公式(2)计算非电离能损失:

$$NIEL(T) = \frac{N_A}{A} \sigma_d E_d = \frac{N_A}{A} \frac{E_d}{N_v x} = \frac{E_d}{\rho x} = \frac{TQ(T)}{\rho x} \quad (2)$$

其中, σ_d 表示位移损伤部分, E_d 表示位移损伤的能量, N_v 表示靶材料中的原子密度, x 表示靶厚度, ρ 表示靶密度。

反冲原子的能量和方向可以通过二体碰撞获取的散射角得到。在中子弹性散射中, 可以通过公式(3)得到反冲原子的能量:

$$E_{out} = \frac{4AE_{in}}{(1+A)^2} \cos^2 u \quad (3)$$

其中, E_{out} 和 E_{in} 表示出射和入射能量, u 表示反冲原子相对于入射中子的散射角。

克莱因仁科公式表示了从单个自由电子以最低量子电动力学顺序散射的光子的微分截面。对于能量 E_r 的入射光子, 微分截面计算式如(4)所示:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 r_c^2 p(E_r, \theta)^2 \left[p(E_r, \theta) + p(E_r, \theta)^{-1} - 1 + \cos^2(\theta) \right]}{2} \quad (4)$$

$$p(E_r, \theta) = \frac{1}{1 + (E_r/m_e c^2)(1 - \cos\theta)} = \frac{\lambda}{\lambda'} \quad (5)$$

$d\sigma/d\Omega$ 表示微分截面, $d\Omega$ 表示无限小立体角、 α 表示精细结构常数, θ 表示散射角, $r_c = h/m_e c$ 表示电子的“约化”康普顿波长, m_e 表示电子质量, 公式(5)所示 $p(E_r, \theta)$ 为碰撞前后光子能量的比值。

3. 模拟方法

3.1. 物理模型构建

Geant4 是一个用于模拟粒子或辐射穿过物质的工具包。基于 Geant4 开发的应用程序可以模拟任何装

置或探测器和辐射源, 并记录源粒子和二次粒子与装置材料相互作用时所选择的物理量输出, 广泛的应用在核技术领域[18]。

中子与物质相互作用主要包括弹性散射、非弹性散射、俘获效应和裂变反应。弹性散射中, 靶材料原子被撞出晶格位置, 产生 PKA, 在原位形成空位缺陷, 如果 PKA 的能量足够大, 会与材料继续反应, 产生次级离位原子(SKA), 从而产生级联碰撞; 非弹性散射等过程会生成能量较高的产物, 这些产物与原子核发生屏蔽库仑散射, 实现产物在材料中慢化, 同时屏蔽库仑散射会传递足够高的能量使晶格原子离位, 导致位移损伤。在本文研究中, 采用了 10.04 版本的 Geant4, 调用其内部预编译的模拟模型 QGSP_BIC_HP, 该模型适用于 0.025 eV~20 MeV 能量范围内的中子物理过程, 能够很好的分析中子在半导体材料输运过程中产生的各种次级粒子的能谱、角分布、空间位置等。该预编译模型包含 G4LCapture、G4NeutronHPCapture、G4LFission、G4NeutronHPFission、G4LENeutronInelastic、G4LElastic、G4NeutronHPElastic 等。

3.2. 几何结构

在实际空间辐射环境下入射粒子的能量分布通常是连续的, 因此为模拟真实辐射环境下的辐照效应, 采用了能量在 10 eV~20 MeV 区间均匀分布的随机面源作为粒子源模型。另一方面, 对于核辐射探测器领域中的 Ga_2O_3 器件, 其尺寸常在微米量级, 研究粒子辐照对半导体器件的影响, 必须要建立粒子入射实际中微米尺度探测器后输运过程中产物的能量和分布。基于上述考虑, 本文模拟了微米尺度下的 Ga_2O_3 材料的辐照损伤情况, 粒子源是采用的连续中子能谱, 能量分布从 10 eV~20 MeV, Ga_2O_3 材料厚度是 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$, 本次 Geant4 建模几何结构如图 1 所示。

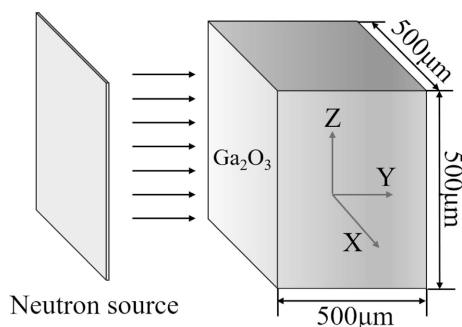


Figure 1. Schematic diagram of Ga_2O_3 model and incident particle source model

图 1. Ga_2O_3 模型及入射粒子源模型示意图

4. 结果和讨论

4.1. PKA 能谱分布

中子在 Ga_2O_3 中的输运过程中会与 Ga、O 原子发生弹性碰撞, 导致 Ga 原子与 O 原子发生离位, 形成了空穴。本文模拟了 5×10^6 个不同能量的中子辐照 Ga_2O_3 , 产生数万个 PKA。如图 2 所示是 Ga 原子和 O 原子 PKA 能谱分布图。Ga、O 原子的 PKA 数量随着能量的增大逐渐减少, PKA 主要集中在低能区, 因此中子与 Ga 原子和 O 原子更易发生低能传输的弹性散射过程。此外, 从数量上看, Ga 原子 PKA 数量大于 O 原子 PKA 数据, 这反映出相对于 O 原子中子更容易造成 Ga 原子离位。从能量上看, O 原子最大能量 3.5 MeV 大于 Ga 原子能量, 二者是在后续级联碰撞中造成位移损失的主要来源。

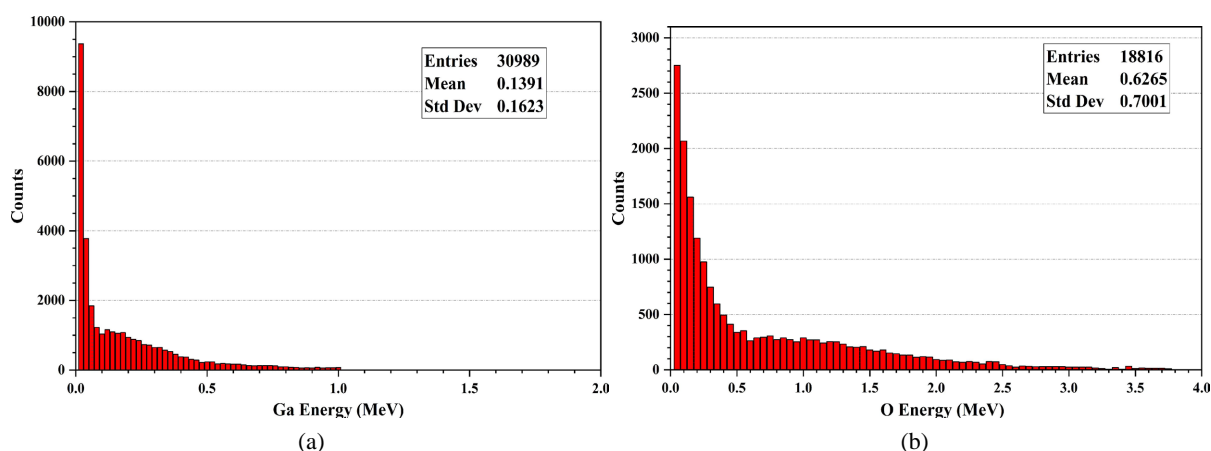


Figure 2. (a) PKA energy spectrum of Ga atoms, (b) PKA energy spectrum of O atoms

图 2. (a) Ga 原子的 PKA 能谱, (b) O 原子的 PKA 能谱

4.2. PKA 散射角

通过进一步提取离位原子的散射角分布, 能够得到中子与晶格原子左右产生离位原子的散射角大小与分布情况, 如图 3 所示是 Ga 原子 PKA 和 O 原子 PKA 的散射角分布图。从 Ga、O 原子的散射角分布可知, 离位原子的散射角都小于 90 度, 均发生向前散射, 散射角大小决定了离位原子动量方向, 对于研究级联碰撞具有重要意义[19]。从图中可以看出, 离位原子的散射角具有明显的各向异性, 离位原子向前散射更加显著, 所有 Ga 与 O 原子的离位原子初始动量方向与入射中子动量方向之间的夹角小于 90 度, 说明中子在微米级的 Ga_2O_3 材料中输运时只发生一次碰撞就会飞出模型, 从而不会出现离位原子的反冲角大于 90 度的情况。这为后续级联碰撞中初始离位原子的动量方向给出了依据。

为了分析离位原子散射角不连续分布的原因, 本文分别模拟计算了能量为 0.2 MeV、0.5 MeV、5 MeV、10 MeV 的中子入射产生的离位原子的散射角分布情况。由图 4 可知, 当入射中子能力较低时, 其在 Ga_2O_3 材料中主要是发生弹性散射, 散射角连续分布, 而随着入射中子能量的增加, 弹性散射逐渐减弱, 非弹性散射作用逐渐加强, 导致散射角的分布不再是连续分布。

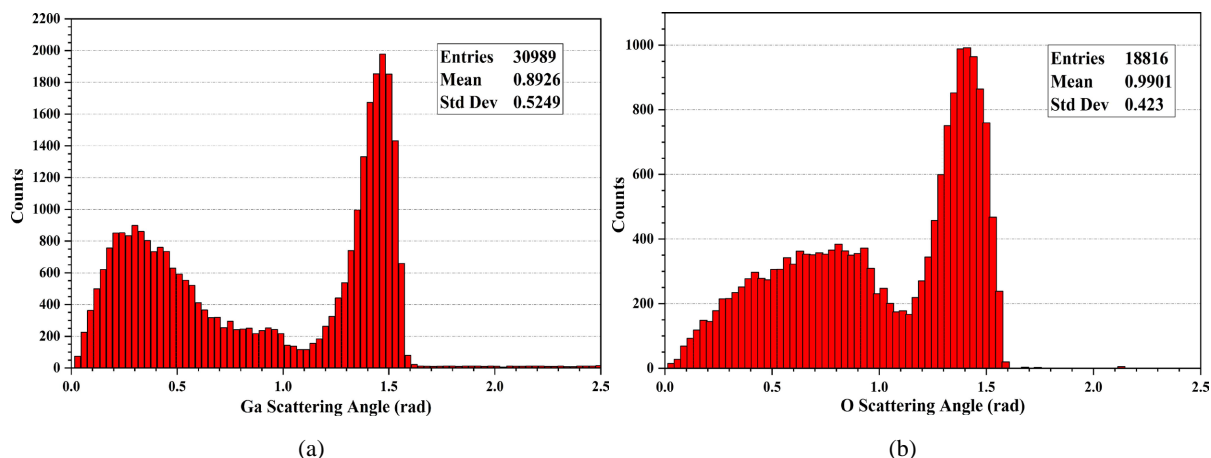


Figure 3. (a) Scattering angle distribution of Ga atoms, (b) Scattering angle distribution of O atoms

图 3. (a) Ga 原子的散射角分布, (b) O 原子的散射角分布

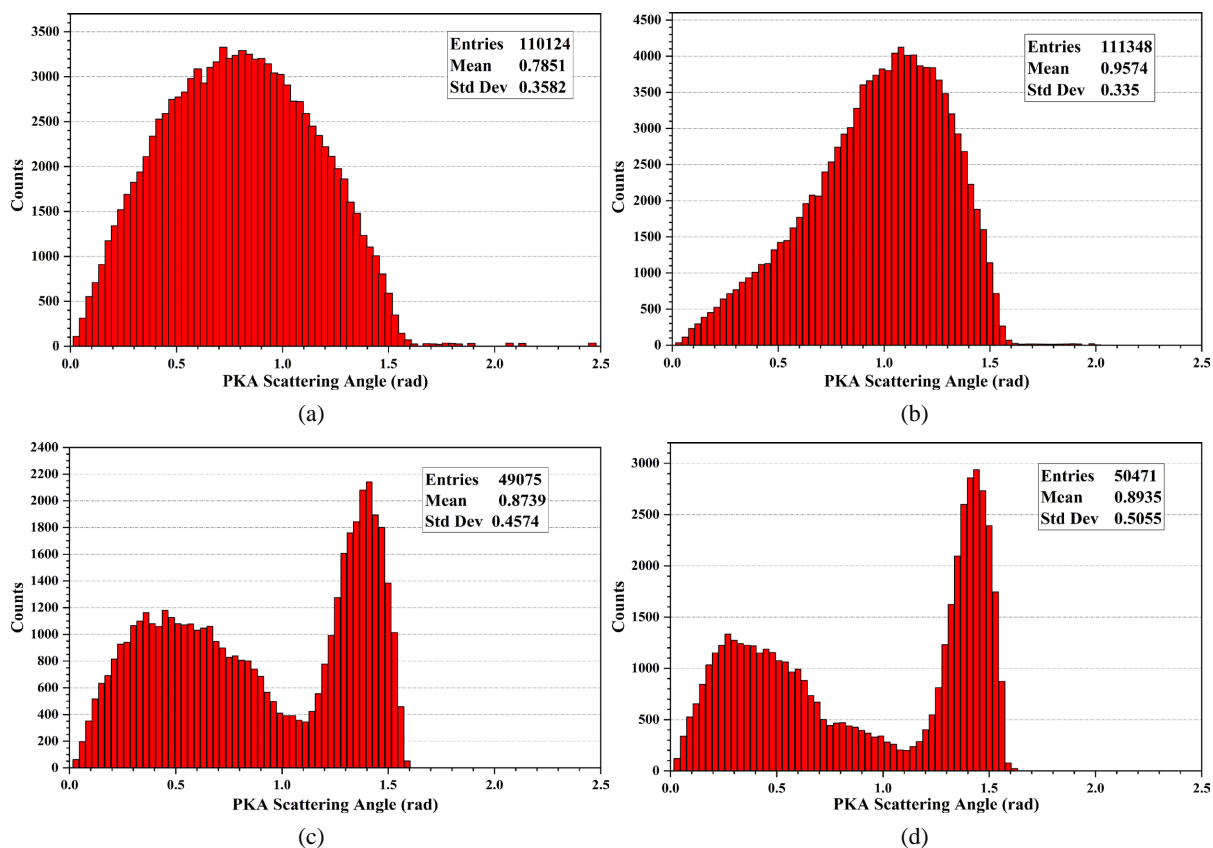


Figure 4. Scattering angle distribution of off-site atoms at neutron energies of (a) 0.2 MeV, (b) 0.5 MeV, (c) 5 MeV, (d) 10 MeV

图 4. 中子能量为(a) 0.2 MeV, (b) 0.5 MeV, (c) 5 MeV, (d) 10 MeV 时离位原子的散射角分布情况

4.3. 次级离位原子

由于中子与固体材料之间作用过程主要是两种形式：与原子核作用和与核外电子作用。中子电中性决定了其与电子的作用可忽略不计，因此中子本身几乎不会造成电离损伤；中子与原子核之间会发生弹性散射(n, n)、非弹性散射(n, n)、辐射俘获(n, γ)及裂变反应，其中 Ga、O 原子 PKA 主要是弹性散射过程造成的，而根据存在的(n, γ)、(n, α)和(n, p)过程，还可以考虑提取次级的 γ 光子、 α 粒子等带电粒子的能谱，如图 5 所示是次级 γ 和次级 α 粒子能谱图。由图 5 可知，中子在 Ga_2O_3 材料中产生的次级 γ 粒子主要是低能传输事件，但其数量更大，最大能量达到 8.8 MeV，这表明在非弹性散射时中子损失的能量较弹性散射更大，对其物理过程进一步分析，发现主要是有康普顿散射、瑞利散射、gamma 转化。次级 alpha 粒子比 γ 粒子数量小一个数量级，且数目随着能量的变化先增大后逐步减小，在 3 MeV 左右达到峰值，但 alpha 粒子能量最大值达到 19 MeV，这也说明在裂变反应过程发生时中子的能量损失也很大，对其物理过程分析，主要是离子电离作用、非弹性相互作用。

如图 6 所示为中子辐照 Ga_2O_3 材料产生的次级质子、次级中子、次级电子的能谱。从图 6 中可知，次级中子数量很大，而且能量较高，对其物理过程进行分析发生了弹性散射与非弹性散射。次级质子数量相比于次级中子、电子小一个数量级，但其能量较大，这表明中子在 Ga_2O_3 材料中发生了比较显著的核反应，进一步分析，质子的物理过程是强子电离、弹性散射、非弹性散射。中子在 Ga_2O_3 材料中运输过程中不与电子发生作用，次级电子的来源主要是由次级带电粒子运输产生的，进一步分析产生次级电子的物理过程有多次散射、电子电离、湮灭、韧致辐射。

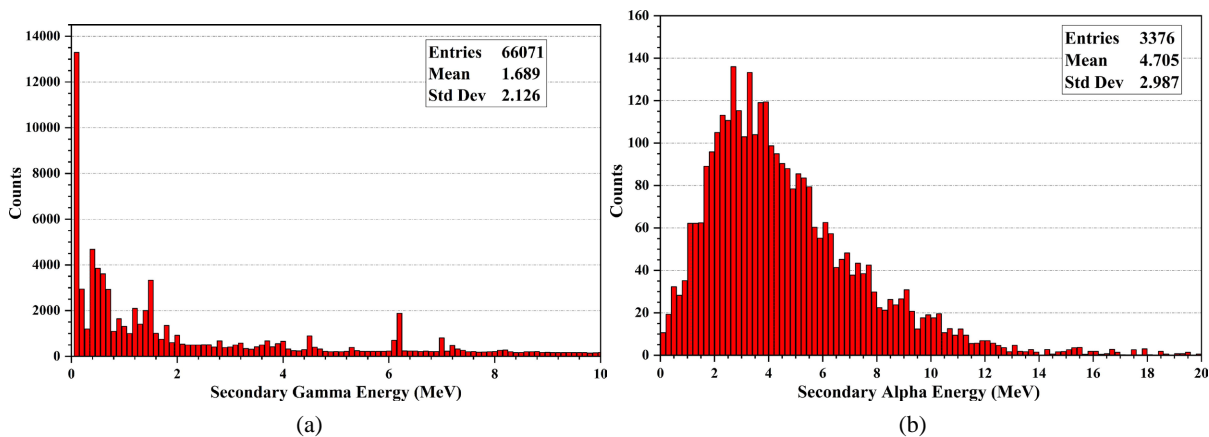


Figure 5. (a) Secondary gamma energy spectrum, (b) secondary alpha particle energy spectrum

图 5. (a)次级 gamma 能谱, (b) 次级 alpha 粒子能谱

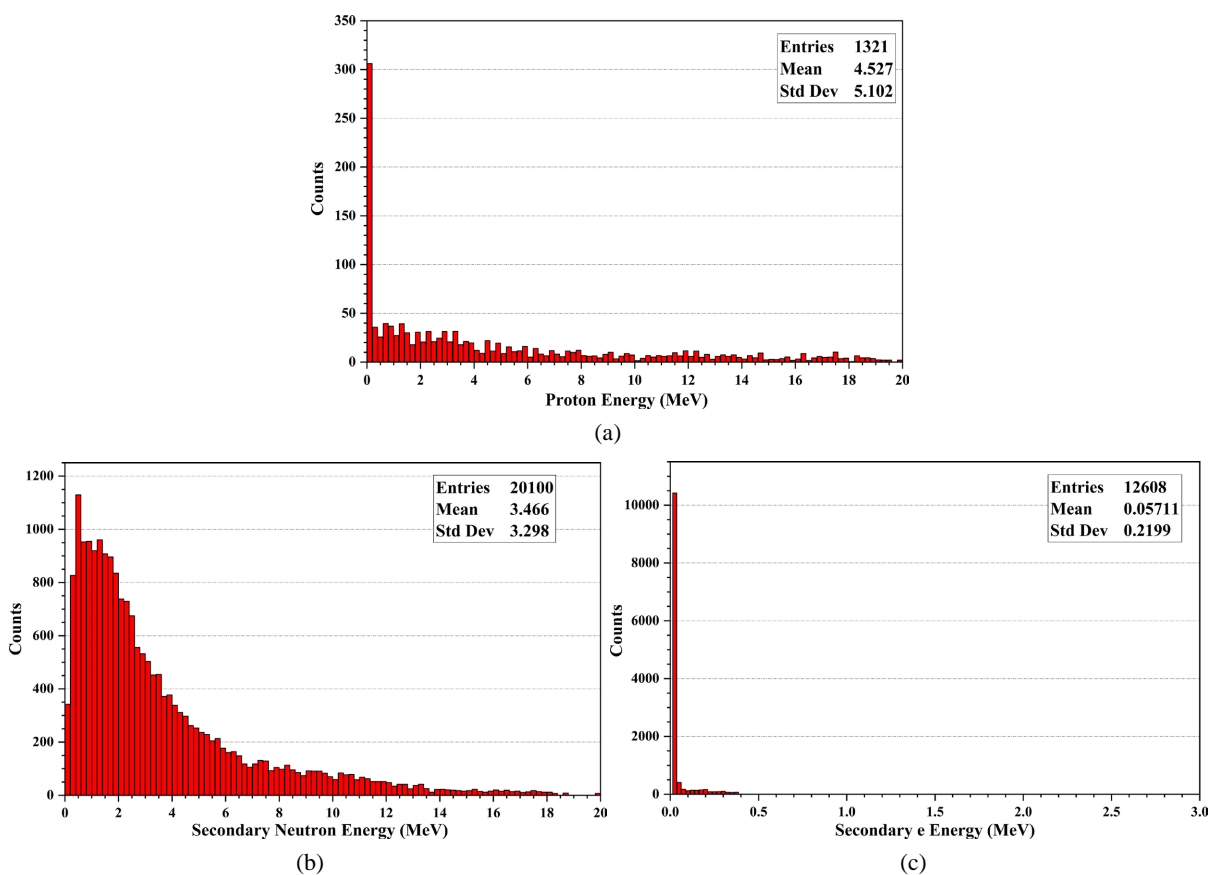


Figure 6. (a) Secondary proton energy spectrum, (b) secondary neutron energy spectrum, (c) the energy spectrum of secondary electrons

图 6. (a) 次级质子能谱, (b) 次级中子能谱, (c) 次级电子的能谱

如图 7 所示为中子辐照 Ga_2O_3 材料产生的其它次级粒子的反冲角分布图, 纵轴是数量。从图 7 中可以看出, 次级 gamma、次级电子、次级质子、次级 alpha 粒子的反冲角近似是以 90° 度为中心在 0 到 π 之间呈高斯分布。这与 Ga、O 原子 PKA 的小角度向前散射完全不同。

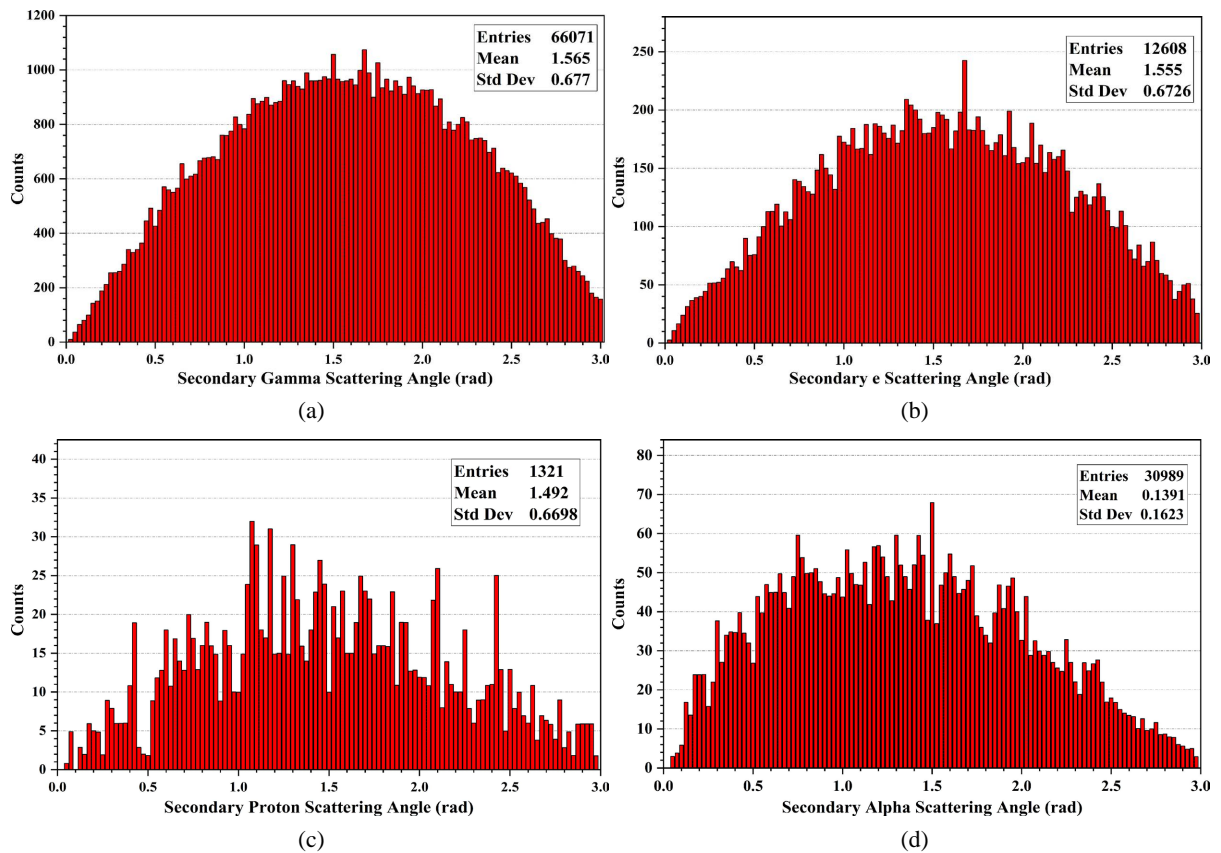


Figure 7. (a) Secondary gamma scattering angle, (b) secondary electron scattering angle, (c) secondary proton scattering angle, (d) secondary alpha particle scattering angle

图 7. (a) 次级 gamma 散射角, (b) 次级电子散射角, (c) 次级质子散射角, (d) 次级 alpha 粒子散射角

5. 结语

在本文, 我们采用基于蒙特卡洛方法的 Geant4 模拟软件, 搭建了用于研究中子辐照 Ga_2O_3 材料产生损失的仿真平台。通过设计物理模型与计算方法, 利用面向对象的编程思想完成了各模型的程序设计, 并且在 Geant4 内核支撑下模拟了连续能谱的中子源入射 Ga_2O_3 材料的输运过程。通过研究, 本文取得以下结论:

1) 中子在 Ga_2O_3 材料中输运产生 Ga、O 原子 PKA 的过程主要是弹性散射造成, 散射过程中以低能传输事件为主, PKA 数量峰值在 20 keV 左右, 随着能量的增大 PKA 数量不断减小; 对于微米量级的 Ga_2O_3 模型, 产生的 Ga、O 原子的 PKA 反冲角分布在 $0 \sim \pi/2$ 之间, 全部发生小角度散射。

2) 中子在 Ga_2O_3 材料中非弹性散射造成的能量损失大于弹性散射, 并且裂变反应也造成了较大的中子能量损失, 此外还发生了较为显著的核反应。

3) 中子在 Ga_2O_3 材料中输运时除了产生 Ga、O 原子的 PKA 之外, 还会产生一定数量的次级质子、伽马粒子、中子及 alpha 粒子。所有这些粒子都会在后续的输运过程中造成电离损伤和位移损伤。

模拟结果为中子辐照环境下 Ga_2O_3 材料的实验研究提供理论指导, 对 Ga_2O_3 材料应用于深空探测具有参考价值。

基金项目

本研究得到了国家重点研发项目(2022YFB1902700)、国家教育部装备预研联合基金(8091B042203)、

国家自然科学基金(11875129)、国家强脉冲辐射模拟与效应重点实验室基金(SKLIPIR1810)、辐射应用创新中心基金(KFZC2020020402)、北京大学核物理与技术国家重点实验室基金(NPT2023KFY06)、中国铀业有限责任公司与华东理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金(2022NRE-LH-02)、中央高校基础研究基金(2023JG001)等支持。

参考文献

- [1] Polyakov, A.Y., Smirnov, N.B., Shchemerov, I.V., Pearton, S.J., Ren, F., Chernykh, A.V., *et al.* (2018) Hole Traps and Persistent Photocapacitance in Proton Irradiated β -Ga₂O₃ Films Doped with Si. *APL Materials*, **6**, Article ID: 096102. <https://doi.org/10.1063/1.5042646>
- [2] Polyakov, A.Y., Smirnov, N.B., Shchemerov, I.V., Vasilev, A.A., Yakimov, E.B., Chernykh, A.V., *et al.* (2020) Pulsed Fast Reactor Neutron Irradiation Effects in Si Doped N-Type β -Ga₂O₃. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53**, Article ID: 274001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab83c4>
- [3] Bhuiyan, A.F.M.A.U., Feng, Z., Huang, H., Meng, L., Hwang, J. and Zhao, H. (2021) Metalorganic Chemical Vapor Deposition of α -Ga₂O₃ and α -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ Thin Films on M-Plane Sapphire Substrates. *APL Materials*, **9**, Article ID: 101109. <https://doi.org/10.1063/5.0065087>
- [4] Liu, X., Wang, H., Chiu, H., Chen, Y., Li, D., Huang, C., *et al.* (2020) Analysis of the Back-Barrier Effect in Al-GaN/GaN High Electron Mobility Transistor on Free-Standing GaN Substrates. *Journal of Alloys and Compounds*, **814**, Article ID: 152293. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152293>
- [5] Bae, J., Kim, H.W., Kang, I.H. and Kim, J. (2020) Dual-Field Plated β -Ga₂O₃ nano-FETs with an Off-State Breakdown Voltage Exceeding 400 V. *Journal of Materials Chemistry C*, **8**, 2687-2692. <https://doi.org/10.1039/c9tc05161a>
- [6] Zhang, H., Yuan, L., Tang, X., Hu, J., Sun, J., Zhang, Y., *et al.* (2020) Progress of Ultra-Wide Bandgap Ga₂O₃ Semiconductor Materials in Power MOSFETs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **35**, 5157-5179. <https://doi.org/10.1109/tpel.2019.2946367>
- [7] Farzana, E., Chaiken, M.F., Blue, T.E., Arehart, A.R. and Ringel, S.A. (2018) Impact of Deep Level Defects Induced by High Energy Neutron Radiation in β -Ga₂O₃. *APL Materials*, **7**, Article ID: 022502. <https://doi.org/10.1063/1.5054606>
- [8] Sun, R., Chen, X., Liu, C., Chen, W. and Zhang, B. (2021) Degradation Mechanism of Schottky P-GaN Gate Stack in GaN Power Devices under Neutron Irradiation. *Applied Physics Letters*, **119**, Article ID: 133503. <https://doi.org/10.1063/5.0065046>
- [9] Lei, Z., Guo, H., Tang, M., Zeng, C., Chen, H. and Zhang, Z. (2016). Heavy Ions Irradiation Effects on AlGaN/GaN High Electron Mobility Transistors. 2016 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Bremen, 19-23 September 2016, 1-4. <https://doi.org/10.1109/radecs.2016.8093107>
- [10] Holmes-Siedle, A. and Adams, L. (2002) Handbook of Radiation Effects. Oxford University Press.
- [11] Yang, G., Jang, S., Ren, F., Pearton, S.J. and Kim, J. (2017) Influence of High-Energy Proton Irradiation on β -Ga₂O₃ Nanobelt Field-Effect Transistors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **9**, 40471-40476. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13881>
- [12] Ai, W., Liu, J., Feng, Q., Zhai, P., Hu, P., Zeng, J., *et al.* (2021) Degradation of β -Ga₂O₃ Schottky Barrier Diode under Swift Heavy Ion Irradiation. *Chinese Physics B*, **30**, 056110. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abf107>
- [13] Zhang, Z., Lei, Z., Tong, T., Li, X., Xi, K., Peng, C., *et al.* (2019) Tibetan-Plateau-Based Real-Time Testing and Simulations of Single-Bit and Multiple-Cell Upsets in QDRII+ SRAM Devices. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **66**, 1368-1373. <https://doi.org/10.1109/tns.2019.2913190>
- [14] Lorenz, K., Marques, J.G., Franco, N., Alves, E., Peres, M., Correia, M.R., *et al.* (2008) Defect Studies on Fast and Thermal Neutron Irradiated GaN. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **266**, 2780-2783. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.03.116>
- [15] Lü, L., Hao, Y., Zheng, X., Zhang, J., Xu, S., Lin, Z., *et al.* (2012) Proton Irradiation Effects on HVPE GaN. *Science China Technological Sciences*, **55**, 2432-2435. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4953-z>
- [16] Wang, R.X., Xu, S.J., Fung, S., Beling, C.D., Wang, K., Li, S., *et al.* (2005) Micro-Raman and Photoluminescence Studies of Neutron-Irradiated Gallium Nitride Epilayers. *Applied Physics Letters*, **87**, Article ID: 031906. <https://doi.org/10.1063/1.1999011>
- [17] Lazanu, I. and Lazanu, S. (2005) Silicon Detectors: From Radiation Hard Devices Operating Beyond LHC Conditions to Characterization of Primary Fourfold Coordinated Vacancy Defects. *Romanian Reports in Physics*, **57**, 342-348.
- [18] Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Arce, P., Asai, M., Aso, T., *et al.* (2016) Recent developments in GEANT4. *Nuc-*

lear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **835**, 186-225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>

- [19] Konoplev, V., Caturla, M.J., Abril, I. and Gras-Marti, A. (1994) Bulk Atomic Relocation in Low-Energy Collision Cascades in Silicon: Molecular Dynamics versus Monte Carlo Simulations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **90**, 363-368. [https://doi.org/10.1016/0168-583x\(94\)95572-7](https://doi.org/10.1016/0168-583x(94)95572-7)