

近地轨道质子和 α 粒子入射 InP 产生的位移损伤模拟*

白雨蓉 李培† 何欢 刘方 李薇 贺朝会

(西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

(2023 年 9 月 15 日收到; 2023 年 11 月 30 日收到修改稿)

磷化铟 (InP) 材料具有禁带宽度大、电子迁移率高、耐高温、抗辐照等优点, 是制备航天器电子器件的优良材料. 近地轨道内的质子和 α 粒子对近地卫星威胁巨大, 其在 InP 电子器件中产生的位移损伤效应是导致 InP 电子器件电学性能下降的主要因素. 本文使用蒙特卡罗软件 Geant4 研究近地轨道的质子与 α 粒子分别经过 150 μm 二氧化硅和 2.54 mm 铝层屏蔽后, 在 500/1000/5000 μm InP 材料中产生的非电离能量损失 (non-ionizing energy loss, NIEL)、平均非电离损伤能随深度分布以及年总非电离损伤能. 研究发现: 低能质子射程短且较易发生非电离反应, 入射粒子能谱中低能粒子占比越大, 材料厚度越小, NIEL 值越大; 计算质子和 α 粒子年总非电离损伤能, 质子的年总非电离损伤能占比达 98%, 表明质子是近地轨道内产生位移损伤的主要因素; α 粒子年总非电离损伤能占比小, 但其在 InP 中的 NIEL 约为质子的 2—10 倍, 应关注 α 粒子在 InP 中产生的单粒子位移损伤效应. 本文计算为 InP 材料在空间辐射环境的应用提供了参考依据.

关键词: 磷化铟, 位移损伤, Geant4, 非电离能量损失, 近地轨道

PACS: 24.10.Lx, 71.55.Eq, 61.80.Jh

DOI: 10.7498/aps.73.20231499

1 引言

磷化铟 (InP) 材料具有带隙大、电子迁移率高、光电转换效率高、耐高温、耐辐射等优点, 被广泛应用于光通信、高频毫米波、光电集成电路、卫星通信、空间太阳能电池等领域^[1-3], 是制备航天器电子器件首选材料. 研究表明空间粒子辐照产生的位移损伤会使 InP 器件的电学性能下降^[4-6]. 近地卫星运行轨道高度为 400—2000 km, 其中质子占比为 99.95%, α 粒子占比为 0.04%, 其他种类重离子占比约为 0.01%, α 粒子占比少但可能产生单粒子位移损伤. 因此, 有必要研究近地轨道内质子和 α 粒子在不同工况下 InP 材料中产生的位移损伤规律, 为 InP 电子器件在航天环境中的应用提供参考.

国内外对于电子器件位移损伤效应的研究表明, 非电离能量损失 (non-ionizing energy loss, NIEL) 与辐照粒子引起的电学性能损伤因子 (如载流子产生寿命损伤因子、粒子损伤因子、普适暗电流损伤因子等) 成线性相关^[4,7-9]. 因此 NIEL 可作为标度, 衡量不同种类、能量的辐射粒子在不同材料中产生位移损伤能力的强弱. 即 NIEL 越大, 则辐射粒子在半导体材料中产生位移损伤的能力越强, 导致半导体器件的电学性能衰减越多. Yamaguchi 等^[3] 用 1—20 MeV 质子入射 InP 太阳能电池, 发现 NIEL 与 InP 太阳能电池的电学损伤系数呈线性相关. Shatalov 等^[2] 用中子、电子、 γ 辐照 InP/InGaAs HBT, 发现 InGaAs NIEL 与 BC 结饱和电流损伤系数成超线性相关, 即部分数据略偏离线性关系, 可能原因在于 Shatalov 等^[2] 用 InGaAs NIEL 代替 InP/

* 国家自然科学基金 (批准号: 11975179) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lipei0916@xjtu.edu.cn

InGaAs HBT 器件 NIEL, 导致 NIEL 计算不准; Li 等^[10] 研究了 3—10 MeV 质子入射 InP/InGaAs HBT 器件, 分别计算了 InP 和 InGaAs 两种材料的 NIEL, 发现低能质子 NIEL 大, 解释了低能质子使 InP/InGaAs HBT 电学性能下降更显著的现象, 限于模拟技术, 仍未计算质子在 InP/InGaAs 器件中的 NIEL. 综上可知, 国内外多使用 NIEL 方法探究 InP 电子器件的位移损伤效应, 但计算 NIEL 方法多为公式推导, 只能计算单个材料的 NIEL, 无法计算不同工况下 InP 电子器件的 NIEL. 同时, NIEL 计算中粒子源多为单能入射, 未考虑空间辐射环境中的粒子能谱入射情况. 导致 NIEL 计算结果略为粗糙, 无法详细分析空间辐射环境下 InP 电子器件的位移损伤机制.

本文用蒙特卡罗软件 Geant4, 基于其丰富的物理数据库, 搭建 NIEL 计算方法^[11,12], 可模拟近地轨道质子和 α 粒子能谱在不同工况下 InP 材料中的运输过程. 考虑两种常见的应用场景: 1) 航天器外部太阳能电池, 质子和 α 粒子经过 150 μm SiO₂ (太阳能电池表面玻璃盖片) 后入射 InP 材料; 2) 航天器内部电子器件, 质子和 α 粒子经过 2.54 mm 铝层后入射 InP 材料. 统计两种工况下的 NIEL, 平均非电离损伤能随深度分布及近地轨道中质子和 α 粒子入射 500/1000/5000 μm InP 材料的年总非电离损伤能量. 研究不同工况和厚度下, 近地轨道质子和 α 粒子 InP 材料中产生的位移损伤机制, 为 InP 电子器件抗辐射加固设计提供参考.

2 模型构建

2.1 计算公式

NIEL 可用于衡量不同辐射粒子在不同材料中产生位移损伤能力的强弱^[8], 单位为 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{g}$, 计算公式如下:

$$\text{NIEL} = \frac{N_A}{A} \sum_i \sigma_i(E) E_{\text{dam}}(E), \quad (1)$$

式中, N_A 为阿伏伽德罗常数, A 为靶原子质量数, E 为反冲原子动能, $\sigma_i(E)$ 为第 i 个反冲原子的离位反应截面. $E_{\text{dam}}(E)$ 为能量为 E 的反冲原子在材料中的非电离损伤能, 即产生位移损伤的能量, 由 Akkerman-Robinson-Lindhard 理论修正得到^[13,14]. Jun 等^[15] 在计算 NIEL 时, 将反应截面与非电离

损伤能的乘积求和简化为

$$\sum_i \sigma_i(E) E_{\text{dam}}(E) = \frac{T_{\text{dam}}}{N_v h}, \quad (2)$$

式中, T_{dam} 是平均非电离损伤能, 将反冲原子 $E_{\text{dam}}(E)$ 加和除以入射粒子数即可得到, N_v 是原子密度, h 为靶材料厚度. 进一步推导得

$$\text{NIEL} = T_{\text{dam}}/(\rho h), \quad (3)$$

式中, ρ 为靶材料密度, InP 材料密度取 4.56 g/cm^3 .

2.2 模拟设置

Geant4 是由欧洲核子研究中心 (CERN) 主导开发^[16], 是一个以 C++ 为底层语言, 以蒙特卡罗方法为基础, 模拟粒子在材料中的运输过程的软件. Geant4 功能强大, 基于不同物理数据库模型, 可以模拟多种能量 (250 eV—TeV)、多种粒子 (光子、轻子、离子、强子等) 与不同材料的相互作用, 广泛应用于辐射物理计算领域^[5,17,18].

图 1 为 Geant4 计算的 1—300 MeV 质子和 α 粒子入射 InP 材料的 NIEL 值, 与文献值一致,

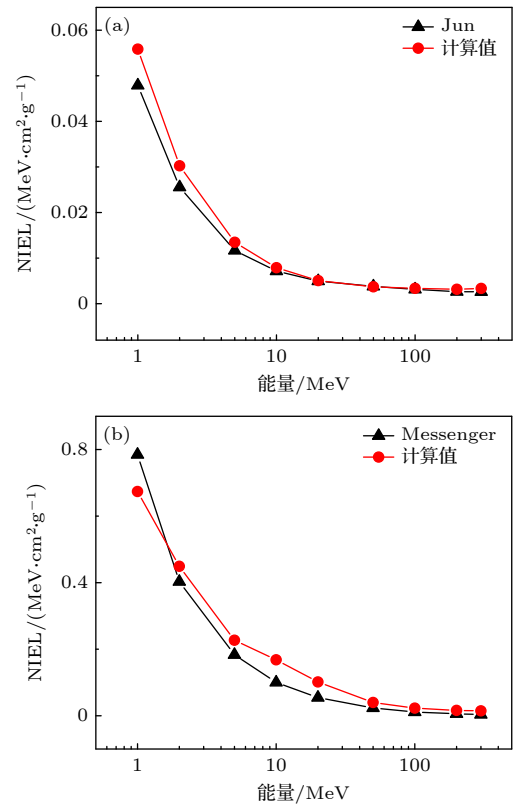


图 1 1—300 MeV 质子和 α 粒子在 InP 中的 NIEL 值 (a) 质子^[15]; (b) α 粒子^[19]

Fig. 1. NIEL of 1—300 MeV protons and α in InP materials: (a) Proton^[15]; (b) α ^[19].

说明本文搭建的 Geant4 物理模型正确, 可以用于 NIEL 的计算. 关于本文物理模型的验证在之前的工作中 [11,12] 已有详细描述, 此处不再赘述.

图 2 为航天器外部 InP 太阳能电池工况设置. 图 2(a) 为 CREME96 [20] 数据库中的近地轨道质子和 α 粒子能谱, 由于 CREME96 数据库仅提供原始能谱和经铝层屏蔽后的能谱, 因此, 150 μm SiO_2 需在 Geant4 中设置, 如图 2(b) 所示.

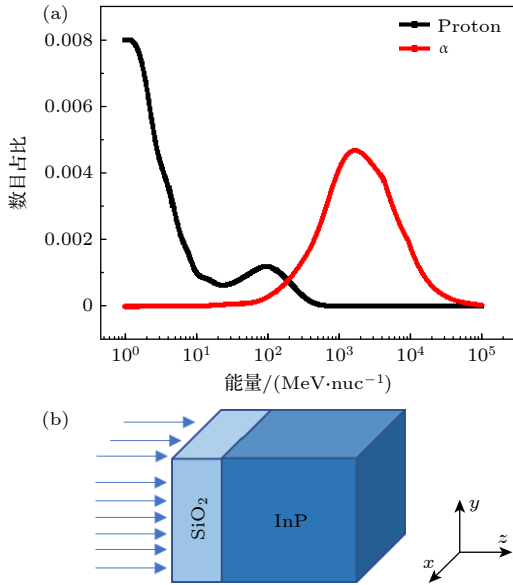


图 2 InP 太阳能电池工况模拟设置图 (a) 近地轨道内质子和 α 粒子能谱; (b) InP 太阳能电池模拟结构图, 即 500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 区域源离子入射 500/1000/5000 μm InP 材料 (深蓝色) 经过 150 μm SiO_2 (浅蓝色) 后的示意图

Fig. 2. The simulation settings of InP solar cell: (a) Proton and α energy spectrum in low Earth orbit; (b) simulation structure diagram of InP solar cells, the schematic of 500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ area source ion-incident 500/1000/5000 μm InP materials (deep blue) after 150 μm SiO_2 (light blue).

图 3 为航天器内部 InP 电子器件工况设置. 图 3(a) 为经过 2.54 mm 铝层屏蔽的近地轨道质子和 α 粒子能谱, 图 3(b) 则为 InP 材料结构. 由于 InP 电子器件各有不同, 模拟某一结构电子器件的位移损伤结果不具有普适性. 另一方面, 由于 InP 材料在电子器件中的作用 (发射区、基区、基底) 不同, 其结构尺寸从几微米到几百微米不等. 因此, 本文选取厚度为 500/1000/5000 μm 的 InP 材料作为主要研究目标.

模拟采用能谱面源入射, 探究 InP 太阳能电池和 InP 电子器件的位移损伤规律时, 入射粒子数为 10^6 个. 计算年总非电离损伤能时, 入射粒子数

根据实际情况设定, 具体设置可见 3.3 节. 由于在 Geant4 程序中对于粒子能量的设置是采用能谱概率取值的方法, 为了保证能谱取值的遍历性和数据的可靠性, 数据都是经过 10 次计算后取平均值得到.

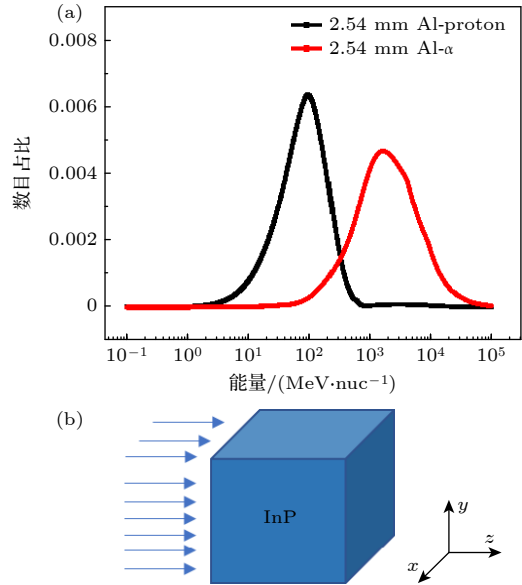


图 3 航天器内部 InP 电子器件工况模拟设置图 (a) 近地轨道内经过 2.54 mm 铝层屏蔽的质子和 α 粒子能谱; (b) InP 材料模拟结构图, 即 500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 区域源离子入射 500/1000/5000 μm InP 材料

Fig. 3. The simulation settings of InP electronics in spacecraft: (a) Proton and α energy spectrum after the shielding of 2.54 mm Al in low Earth orbit; (b) simulation structure diagram of InP solar cells, the schematic of 500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ area source ion-incident 500/1000/5000 μm InP materials.

3 结果分析

3.1 InP 太阳能电池位移损伤

本节使用 Geant4 模拟经 150 μm SiO_2 屏蔽后的近地轨道质子和 α 粒子入射 500/1000/5000 μm InP 的输运过程, 得到该辐射环境下 InP 太阳能电池的位移损伤规律, 为空间 InP 太阳能电池抗辐射加固设计提供参考依据.

表 1 为近地轨道内质子和 α 粒子经玻璃盖片屏蔽后在 500/1000/5000 μm InP 中的 NIEL 汇总表, NIEL 为平均值, 离散系数等于标准差除以平均值. 离散系数数量级为 10^{-2} , 说明数据离散程度小、统计性好.

分析表 1 数据可知, 质子在 InP 中产生的 NIEL 随材料厚度增大而减小, 从 500—5000 μm 下降幅

度大, 达 65.7%. 由 (3) 式可知, NIEL 值的大小与平均非电离损伤能 T_{dam} 有关, 单位长度内的 T_{dam} 越大, NIEL 值越大. 因此分析 T_{dam} 随深度分布, 可以得到质子 NIEL 值随深度大幅下降的原因.

表 1 近地轨道质子及 α 粒子经过 150 μm SiO_2 后在 InP 产生的 NIEL 统计表

Table 1. NIEL of InP induced by proton and α in low Earth orbit after the shielding of 150 μm SiO_2 .

粒子种类	厚度/ μm	NIEL/($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	离散系数
质子	500	0.00219	0.01023
	1000	0.00159	0.01381
	5000	0.00075	0.01017
α	500	0.00705	0.02649
	1000	0.00697	0.01609
	5000	0.00691	0.00797

图 4 为质子和 α 粒子经过 150 μm SiO_2 屏蔽后在 5000 μm InP(同时包含了 500 和 1000 μm 相关信息) 中的平均非电离损伤能 T_{dam} 随深度分布图. 圆点为 T_{dam} , 阴影部分为标准差. 分析图 4(a) 可知, 入射深度为 0—500 μm 时, T_{dam} 随入射深度的增大急剧下降; 入射深度为 1000—5000 μm 时, T_{dam} 随入射深度的增大平缓下降. 原因在于近地轨道内质子能量主要分布在低能 (1—10 MeV) 部分, 其在 InP 材料中的射程大部分小于 500 μm , 因此大部分低能质子在 InP 材料前端 (< 500 μm) 完全沉积, 会出现较为剧烈的 T_{dam} 随深度分布不均匀现象. 而少部分中高能粒子射程远大于材料厚度, 在材料中沉积的能量小, 出现 T_{dam} 在材料后端分布均匀的趋势. 最终使 T_{dam} 呈现前端过高后端过低的不均匀分布, 进而使 NIEL 值出现明显下降的情况. 由此可知, 能谱中粒子能量分布在低能区域的占比越大, NIEL 值随材料厚度增大的减小幅度越大. 辐射环境下带电粒子在 InP 材料中的 NIEL 值的大小需要综合考虑材料厚度和能谱能量分布两个因素的影响.

而表 1 中 α 粒子在 InP 中产生的 NIEL 值, 从 500—5000 μm 减小幅度为 1.9%, 远小于质子的 NIEL 值减小幅度. 结合图 4(b) 可知, 能谱中 α 粒子能量主要分布在 600—5000 MeV/nuc 内, 粒子射程远大于 5000 μm , 在 500/1000/5000 μm InP 中的非电离能量沉积为均匀分布, 因此其 NIEL 值随 InP 材料厚度变化小.

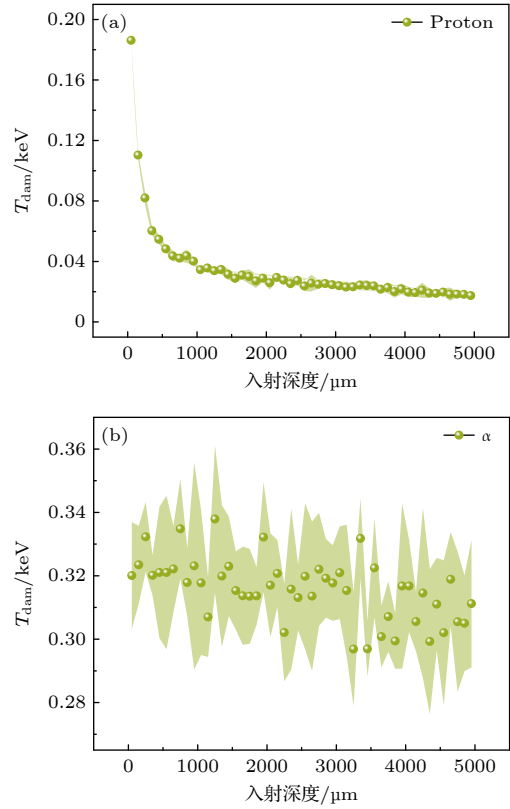


图 4 近地轨道内质子和 α 粒子经过 150 μm SiO_2 屏蔽后入射 5000 μm InP 中产生的 T_{dam} 随深度分布, 数值的阴影是通过 10 次模拟计算得出的标准偏差

Fig. 4. The distribution of T_{dam} with depth of 5000 μm InP materials induced by proton and α in low Earth orbit after the shielding of 150 μm SiO_2 . The shadow of values is standard deviation which is calculated by ten simulations.

3.2 航天器内 InP 电子器件位移损伤研究

本节使用 Geant4 模拟经 2.54 mm 铝层屏蔽后的近地轨道辐射粒子入射 500/1000/5000 μm InP 的运输过程. 表 2 为近地轨道内质子和 α 粒子经 2.54 mm 铝层屏蔽后在 500/1000/5000 μm InP 中的 NIEL 汇总表, 离散系数数量级也为 10^{-2} , 说明数据离散程度小、统计性好. 分析表 2 可知, 质子

表 2 近地轨道质子及 α 粒子经过 2.54 mm 铝层后在 InP 产生的 NIEL 统计表

Table 2. NIEL of InP induced by proton and α in low Earth orbit after the shielding of 2.54 mm Al.

粒子种类	厚度/ μm	NIEL/($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	离散系数
质子	500	0.00403	0.00511
	1000	0.00387	0.00554
	5000	0.00300	0.00840
α	500	0.00704	0.01135
	1000	0.00702	0.00505
	5000	0.00689	0.00290

表 3 不同屏蔽材料下近地轨道的质子和 α 粒子在 500 μm InP 中产生的年总非电离损伤能汇总
 Table 3. Annual non-ionizing damage energy and percent of proton and α in low Earth orbit after the shielding of 150 μm SiO_2 and 2.54 mm Al in 500 μm InP materials.

屏蔽材料	入射粒子	粒子数目	总非电离损伤能/MeV	占比/%
150 μm SiO_2	质子	53395886	26452.04	98.73
	α	222307	339.85	1.27
2.54 mm 铝	质子	94458945	86520.48	99.58
	α	219853	365.77	0.42

NIEL 随厚度的增大而减小, 减小幅度为 25%. 结合图 5(a) 分析, 经过 2.54 mm 铝层屏蔽后的近地轨道内质子在 5000 μm InP 中产生的 T_{dam} 随深度的增大而线性下降, 平均非电离损伤能主要分布在 0.08—0.2 keV 内, 未出现图 4 中质子的 T_{dam} 在 InP 材料前端急剧下降的现象. 原因在于铝层屏蔽后的近地轨道质子主要分布在 50—200 MeV, 此能量段质子在 InP 材料中的射程皆大于 5000 μm , 不存在大量低能质子在材料前端发生非电离能量沉积的情况, 因此 T_{dam} 波动变化相较于图 4 变化小.

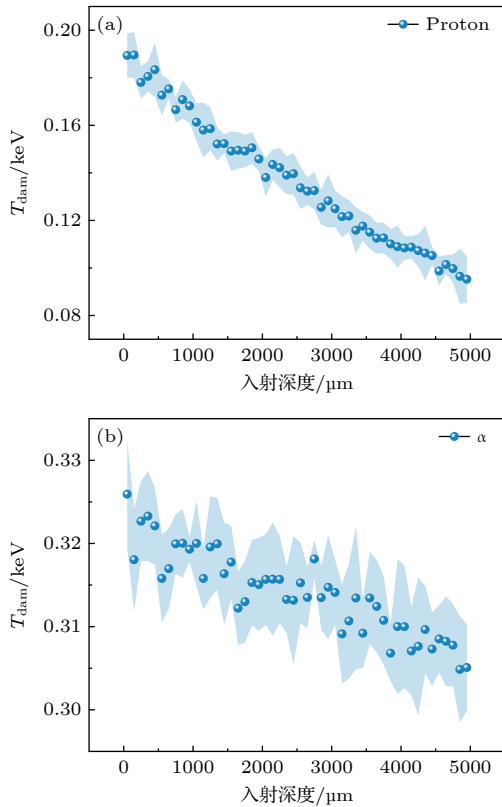


图 5 近地轨道内质子和 α 粒子经过 2.54 mm 铝层后在 5000 μm InP 中产生的 T_{dam} 随深度分布, 数值的阴影是通过 10 次模拟计算得出的标准偏差

Fig. 5. The distribution of T_{dam} with depth of 5000 μm InP materials induced by proton and α in low Earth orbit after the shielding of 2.54 mm Al. The shadow of values is standard deviation which is calculated by ten simulations.

表 2 中 α 粒子在 500/1000/5000 μm InP 中产生的 NIEL 值随厚度的增大而减小, 减小幅度为 2.1%, 与表 1 中 α 粒子的 NIEL 值减小幅度 1.9% 接近. 结合图 5(b) 分析, 铝层屏蔽后的近地轨道 α 粒子在 5000 μm InP 中产生的 T_{dam} 随入射深度的增大而下降, 但下降幅度较小, 损伤能主要分布在 0.3—0.33 keV, 与图 4(b) 中 T_{dam} 的分布范围接近. 原因在于经铝层屏蔽前后的近地轨道 α 粒子能谱能量变化小, 则两者 T_{dam} 分布范围接近.

3.3 年总非电离损伤能

在实际辐射环境中, 近地轨道的质子和 α 粒子通量不同, 通过将质子和 α 粒子数目设置为实际年入射量, 比较两者在 500 μm InP 材料中产生的总非电离损伤能, 可以更为直观地体现近地轨道中质子和 α 粒子在 InP 材料中产生的位移损伤大小.

表 3 为不同屏蔽材料下近地轨道的质子和 α 粒子在 500 μm InP 中产生的总非电离损伤能汇总. 占比为质子或 α 粒子总非电离损伤能除以两者之和. 在近地轨道质子和 α 粒子经过 150 μm SiO_2 入射 500 μm InP 产生的总非电离损伤能中, 质子产生的非电离损伤能占比达 98.73%, α 粒子占比仅为 1.27%; 在近地轨道质子和 α 粒子经过 2.54 mm 铝层后入射 500 μm InP 产生的总非电离损伤能中, 质子产生的非电离损伤能占比达 99.58%, α 粒子占比仅为 0.42%. 说明近地轨道内 InP 材料的位移损伤主要来自于质子辐照.

4 结 论

本文使用 Geant4 研究近地轨道内质子和 α 粒子在不同工况和厚度 (500/1000/5000 μm) 下 InP 材料产生的位移损伤, 得到如下结果. 1) 入射粒子的能谱分布和材料厚度, 决定 NIEL 值大小. 能谱中低能粒子占比越大, 材料厚度越小, NIEL 值越

大. 具体原因在于带电粒子在射程末端沉积能量, 对于百微米量级材料, 低能粒子射程短, 在材料前端产生的非电离沉积能量大, 高能粒子射程大于材料厚度, 在材料中产生的非电离沉积能量少, 导致 T_{dam} 随入射深度增大而减小, 进而使 NIEL 值随材料厚度增大而减小, 同时说明质子和 α 粒子位移损伤严重区域分布在材料前端. 2) 比较质子和 α 粒子在两种工况下的 500 μm InP 材料中产生的总非电离损伤能, 两种工况下的质子在 InP 中产生的总非电离损伤能占比均达 98% 以上, 需重点关注近地轨道中质子在 InP 材料中产生的位移损伤效应. 3) 近地轨道内 α 粒子年总非电离损伤能占比小, 但在 InP 材料中的 NIEL 值约为质子的 210 倍, 需关注近地轨道内 α 粒子的单粒子位移损伤效应. 本文计算结果可为 InP 电子器件在空间辐射环境中的抗辐射加固设计提供参考.

参考文献

- [1] Sun S X, Ji H F, Yao H J, Li S, Jin Z, Ding P, Zhong Y H 2016 *Chin. Phys. B* **25** 4
- [2] Shatalov A, Subramanian S, Klein A 2001 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **48** 2262
- [3] Yamaguchi M, Takamoto T, Taylor S J, Walters R J, Summers G P, Flood D J, Ohmori M 1997 *J. Appl. Phys.* **81** 6013
- [4] Srour J R, Palko J W 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1740
- [5] Jay A, Hemeryck A, Richard N, Martin-Samos L, Raine M, Le Roch A, Mousseau N, Goiffon V, Paillet P, Gaillardin M, Magnan P 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 724
- [6] Nordlund K, Zinkle S J, Sand A E, Granberg F, Averbach R S, Stoller R E, Suzudo T, Malerba L, Banhart F, Weber W J, Willaime F, Dudarev S L, Simeone D 2018 *J. Nucl. Mater.* **512** 450
- [7] Summers G P, Burke E A, Shapiro P, Messenger S R, Walters R J 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1372
- [8] Messenger S R, Burke E A, Summers G P, Xapsos M A, Walters R J, Jackson E M, Weaver B D 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1595
- [9] Srour J R, Marshall C J, Marshall P W 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 653
- [10] Li C H, Lu H L, Zhang Y M, Liu M, Zhao X H 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 1336
- [11] Bai Y R, Li Y H, Liu F, Liao W L, He H, Yang W T, He C H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 172401 (in Chinese) [白雨蓉, 李永宏, 刘方, 廖文龙, 何欢, 杨卫涛, 贺朝会 2021 *物理学报* **70** 172401]
- [12] Li W, Bai Y R, Guo H X, He C H, Li Y H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 082401 (in Chinese) [李薇, 白雨蓉, 郭昊轩, 贺朝会, 李永宏 2022 *物理学报* **71** 082401]
- [13] Akkerman A, Barak J 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3667
- [14] Akkerman A, Barak J 2007 *Nucl. Instrum. Meth. B* **260** 529
- [15] Insoo J, Xapsos M A, Messenger S R, Burke E A, Walters R J, Summers G P, Jordan T 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1924
- [16] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. 2003 *Nucl. Instrum. Meth. A* **506** 250
- [17] Liu L, Mei B, Zheng Z S, Wang L, Bai Y R, Yu Q K, Li P, Zhao H D, Sun Y C, Li B 2023 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **70** 1885
- [18] Xie F, Zang H, Liu F, He H, Liao W L, Huang Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 192401
- [19] Messenger S R, Burke E A, Xapsos M A, Summers G P, Walters R J, Insoo Jun, Jordan T 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1919
- [20] Dietrich W F, Shea M A, Smart D F 1997 *IEEE T. Nucl. Sci.* **44** 2150

Simulation of displacement damage of InP induced by protons and α -particles in low Earth orbit*

Bai Yu-Rong Li Pei[†] He Huan Liu Fang Li Wei He Chao-Hui

(School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 15 September 2023; revised manuscript received 30 November 2023)

Abstract

Indium phosphide (InP) material has many advantages, such as large band gap, high electron mobility, high photoelectric conversion efficiency, high temperature resistance, and radiation resistance, which is superior to silicon (Si) and gallium arsenide (GaAs). Meanwhile InP is widely used in optical communication, high-frequency millimeter waves, optoelectronic integrated circuits, satellite communication, space solar cells, and other fields. Radiation particles incident on InP device can generate displacement atoms inside the device through elastic processes. And these displacement atoms continue cascade collisions to generate lattice defects which are vacancies, interstitials, and clusters. These defects capture electrons-holes by defective energy levels in the energy band, and then resulting in a decrease in the life of minority carriers which is the reason of degradation of InP devices. The process of degradation of InP device, induced by lattice defects from ion-irradiation, is called displacement damage effect (DDE). The non-ionizing loss energy (NIEL) scaling is a useful method to predict the degradation of device caused by DDE of radiation particles. Many studies have shown that the NIEL is linearly related to the damage coefficient of InP device. Previous studies of radiation damage effect of InP device mainly focused on single-energy protons, electrons, and neutrons. Of the particles in low earth orbit (LEO), the vast majority of particles are protons, with a few being α particles and electrons, while the electron's NIEL is too small and its DDE is negligible. The InP's NIEL induced by proton and α energy in LEO has not been studied in detail. Therefore, this paper uses Monte Carlo software Geant4 to study the NIEL, damage energy distribution with depth, and annual total non-ionization loss energy generated by protons and α particles in LEO in 500/1000/5000 μm InP materials. The shielding of 150- μm -thick SiO_2 layer and 2.54-mm-thick Al layer from protons and α particles are used as InP solar cell and InP devices in spacecraft, respectively. It is found that the energy spectrum determines the non-ionizing damage energy T_{dam} distribution, and then influences the NIEL value: the NIEL value increases with T_{dam} increasing and thickness of InP material decreasing. And α NIEL is larger than proton's, the single particle DDE of InP device, induced by α particles, should be concerned. The annual non-ionizing damage energy of proton accounts for 98%, which means that proton is the main factor degrading InP devices in LEO.

Keywords: InP, displacement damage, Geant4, non-ionizing loss energy, low Earth orbit

PACS: 24.10.Lx, 71.55.Eq, 61.80.Jh

DOI: [10.7498/aps.73.20231499](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231499)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11975179).

[†] Corresponding author. E-mail: lipei0916@xjtu.edu.cn



近地轨道质子和 α 粒子入射InP产生的位移损伤模拟

白雨蓉 李培 何欢 刘方 李薇 贺朝会

Simulation of displacement damage of InP induced by protons and α -particles in low Earth orbit

Bai Yu-Rong Li Pei He Huan Liu Fang Li Wei He Chao-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 052401 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231499

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231499>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

InP中子位移损伤效应的Geant4模拟

Geant4 simulation of neutron displacement damage effect in InP

物理学报. 2022, 71(8): 082401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211722>

空间重离子入射磷化铟的位移损伤模拟

Simulation of displacement damage in indium phosphide induced by space heavy ions

物理学报. 2021, 70(17): 172401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210303>

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

Non-ionization energy loss of proton in different regions in SiC

物理学报. 2018, 67(18): 182401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181095>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管器件中子位移损伤效应及机理

Neutron-induced displacement damage effect and mechanism of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200714>

氮化镓在不同中子辐照环境下的位移损伤模拟研究

Simulated research on displacement damage of gallium nitride radiated by different neutron sources

物理学报. 2020, 69(19): 192401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200064>

中子对碲锌镉辐照损伤模拟研究

Simulation study of neutron radiation damage to cadmium zinc telluride

物理学报. 2022, 71(22): 226102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221195>