光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260529001

星敏感器用CMOS APS质子位移损伤粒子输运仿真

王盆生[1]，王祖军[1*]，陈明雷[2]，杨　鑫[3]，管　威[3]，杨国珍[3]

（1. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室，西安 710024；2. 兰州大学 材料与能源学院，兰州 730000；3. 湘潭大学 材料科学与工程学院，湖南 湘潭 411105）

摘　要： 星敏感器是航天器高精度姿态测量的核心部件，其成像焦平面广泛采用互补金属氧化物半导体有源像素传感器（CMOS APS）。在空间质子辐射环境下，CMOS APS会发生位移损伤效应，导致暗电流、暗信号非均匀性、光响应非均匀性等参数退化，甚至功能失效。文章基于Geant4建立CMOS APS器件的几何模型和物理模型，模拟不同能量（1～1 000 MeV）质子及空间站轨道质子与靶原子的相互作用过程，计算初级碰撞原子（PKA）能谱、非电离能量损失及离位原子数。结果表明：低能质子产生大量低能PKA，其位移损伤主要由弹性碰撞主导，空间分布相对均匀；高能质子产生少量高能PKA，其位移损伤主要由非弹性碰撞主导，空间分布极不均匀；1 MeV单能质子与空间站轨道质子的位移损伤效果类似，但空间站轨道质子的位移损伤在CMOS APS耗尽区存在明显峰值。该研究为星敏感器用CMOS APS的抗辐射加固提供了参考依据。

关键词： CMOS APS；质子位移损伤；Geant4仿真；非电离能量损失；离位原子数

中图分类号： TN386　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0863－08

Particle Transport Simulation of Proton Displacement Damage in CMOS APS for Star Trackers

WANG Pensheng[1], WANG Zujun[1], CHEN Minglei[2], YANG Xin[3], GUAN Wei[3], YANG Guozhen[3]

(1. National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, CHN; 2. School of Materials and Energy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, CHN; 3. School of Materials Science and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, CHN)

Abstract: Star sensors are the core components for high-precision spacecraft attitude measurement. They typically utilize complementary metal-oxide-semiconductor active pixel sensors (CMOS APSs) at the imaging focal plane. In the space proton radiation environment, CMOS APS image sensors are affected by displacement damage. This degrades key parameters, such as dark current, dark signal nonuniformity, and photo-response nonuniformity, and can even cause functional failure. In this study, geometric and physical models of CMOS APS devices are developed based on Geant4. These models are used to simulate the interaction processes between target atoms and protons with a range of energies (1～1 000 MeV), as well as those encountered in space-station orbits, to calculate the primary knock-on atom (PKA) energy spectrum, nonionizing energy loss, and number of displaced atoms. The results show that low-energy protons yield numerous low-energy PKAs,

收稿日期：2026－06－26.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（U2167208）；全国重点实验室基金资助项目（NKLIPR2320）；陕西省自然科学基础研究计划资助项目（2024JC-JCQN-10）.

* **通信作者：**王祖军

whose displacement damage is dominated by elastic collisions with relatively uniform spatial distribution. Meanwhile, high-energy protons generate a few high-energy PKAs, whose displacement damage is dominated by inelastic collisions with extremely uneven spatial distribution. While the displacement damage induced by 1 MeV monoenergetic protons is comparable to that of protons in space-station orbits, the latter presents a clear peak in the depletion region of CMOS APSs. This study provides a reference for the radiation hardening of CMOS APSs applied in star sensors.

Key words: CMOS APS; proton displacement damage; Geant4 simulation; non-ionizing energy loss; number of displaced atoms

0 引言

星敏感器作为航天器姿态测量与控制的核心部件,以其精度高、自主性好等优势,已成为各类航天任务中不可或缺的姿态敏感器[1]。互补金属氧化物半导体有源像素传感器(CMOS APS)因具有体积小、功耗低、集成度高等优点[2],正逐步替代传统的电荷耦合器件(CCD),成为星敏感器主流成像器件。然而,航天器在轨运行期间不可避免地会受到空间辐射环境的影响。对于CMOS APS而言,空间质子位移损伤效应尤为突出[3]。空间高能质子入射CMOS APS器件后,通过与半导体材料原子晶格的弹性碰撞和非弹性碰撞产生初级碰撞原子(PKA),PKA进一步引发级联碰撞,在半导体材料原子晶格中引入空位、间隙等缺陷[4]。这些缺陷在禁带中形成复合中心,显著增加CMOS APS的暗电流和暗信号非均匀性[5-9],从而导致星敏感器星点质心定位精度下降、星图识别数量减少,最终影响航天器姿态测量精度[10]。

因此,准确评估空间质子位移损伤效应对CMOS APS器件性能的影响,对于星敏感器的抗辐射加固设计和在轨寿命预测具有重要意义。实验方法[11-12]是研究位移损伤效应的直接途径,但地面辐照实验成本高昂、周期较长,且难以完全复现复杂的空间质子能谱。蒙特卡罗方法能够模拟粒子与物质相互作用的随机过程,为位移损伤的精细化评估提供了有效途径。本文针对星敏感器用CMOS APS的质子位移损伤问题,采用Geant4[13]蒙特卡罗方法开展仿真研究,建立CMOS APS几何结构和物理模型,模拟不同能量质子和空间站轨道质子与CMOS APS靶原子相互作用的过程,得到PKA信息和能谱,并对非电离能量损失(NIEL)和离位原子数(N_d)进行计算。

1 仿真模型

1.1 物理模型

质子与半导体材料晶格原子相互作用,发生弹性散射、非弹性散射、俘获反应以及带电粒子发射等核反应,将一部分或全部动能传递给晶格原子,使得晶格原子离开晶格位置成为PKA。高能PKA继续运动撞击晶格其他原子,产生次级反冲原子,次级反冲原子继续运动撞击其余晶格原子,从而造成一系列级联碰撞,产生空位、间隙原子以及团簇等缺陷[14]。本文基于Geant4标准电磁过程,添加G4ScreenedNuclearRecoil过程,自定义电磁物理构造器PhysListEmStandardNR,对低能质子核反冲进行优化,采用G4HadronElasticPhysics和G4HadronInelasticQBBC分别模拟质子的强子弹性散射过程和强子非弹性散射过程。

1.2 几何结构

图1为CMOS APS像素单位钳位光电二极管(PPD)基本结构,其中包括氧化层、P^+区、N区和P型衬底[15]。质子源为均匀面源,分别取能量为1,2,5,10,20,50,100,200,500,1 000 MeV的质子从氧化层上表面垂直入射CMOS APS。

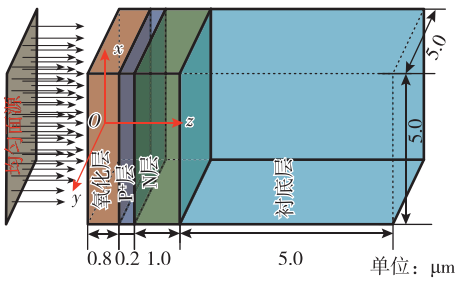


图1 CMOS APS像素单位钳位PPD的基本结构

1.3 计算方法

NIEL是入射粒子在材料中以位移过程和晶格振动过程沉积的能量,计算公式为[16]:

$$NIEL=\frac{N_A}{A}\sum_i\sigma_i(E)E_{dam}(E)=\frac{E_{dam}(E)}{\rho h}\tag{1}$$

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；$E_{dam}(E)$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；ρ为靶材料密度；h为靶材料厚度。

使用 Robinson 和 Akkerman 等[17-19]修正的 Linhard 分离函数（表示位移损伤能量占初级反冲原子能量的比例）可得：

$$E_{dam}(E)=\frac{E}{1+k_d g(\varepsilon_d)}\tag{2}$$

$$k_d=\frac{0.079\,3Z_1^{2/3}Z_2^{1/2}(A_1+A_2)^{3/2}}{(Z_1^{2/3}+Z_2^{2/3})^{3/4}A_1^{3/2}A_2^{1/2}}\tag{3}$$

$$\varepsilon_d=\frac{E}{30.724Z_1Z_2\sqrt{Z_1^{2/3}+Z_2^{2/3}}(1+A_1/A_2)}\tag{4}$$

$$g(\varepsilon_d)=\begin{cases}\varepsilon_d+0.402\,44\varepsilon_d^{3/4}+3.400\,8\varepsilon_d^{1/6}, & E>200\text{ keV}\\ 0.742\varepsilon_d+1.681\,2\varepsilon_d^{3/4}+0.905\,658\varepsilon_d^{1/6}, & E<200\text{ keV}\end{cases}\tag{5}$$

式中，A_1，A_2和Z_1，Z_2分别为PKA和靶原子的原子序数及质量数。

对于化合物，原子序数和质量数取化合物组成元素的加权平均数，即：

$$Z_{2,\,average}=\sum_i n_iZ_i\Big/\sum_i n_i\tag{6}$$

$$A_{2,\,average}=\sum_i n_iA_i\Big/\sum_i n_i\tag{7}$$

离位原子数是指每个点阵原子平均被击发生离位的数目，离位原子数可由 Norgett Robinson Torrens[20]模型计算得到，即：

$$N_d(T)=\begin{cases}0 & T<E_d\\ 1 & E_d\leqslant T\leqslant 2.5E_d\\ 0.4E_{dam}(T)/E_d & T>2.5E_d\end{cases}\tag{8}$$

式中，E_d为材料的离位阈能。

1.4　模型验证

为了验证仿真所选物理模型和计算方法的准确性和可靠性，模拟计算了不同能量质子在Si材料中的NIEL。图2给出了本文和Insoo Jun团队[21]计算得到的不同能量质子在Si中的NIEL。两者在误差允许范围内基本吻合，且随着质子能量的增加，NIEL呈指数降低趋势，表明低能质子在Si材料中的位移损伤大于高能质子，验证了本模型的可信度。

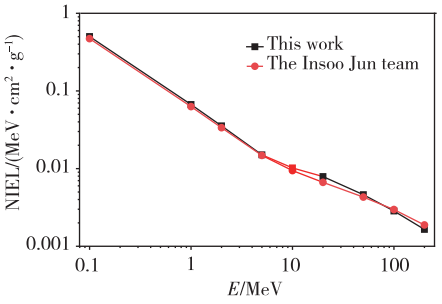


图2　不同能量质子在Si中的NIEL

2　仿真结果

2.1　PKA种类与占比

图3为能量为1 MeV的质子入射CMOS APS产生的PKA数目与质子注量的关系，PKA数目与质子注量保持极好的线性关系。为后续模拟过程中能够产生足够数量的O-PKA和Si-PKA样本，仿真选择模拟注量为1×10^{14} cm^{-2}。

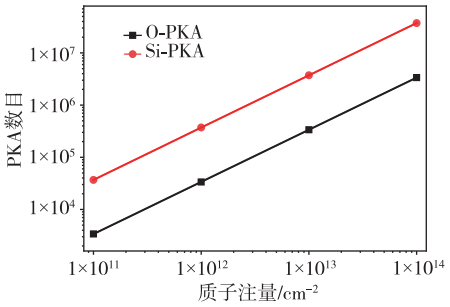


图3　PKA数目与质子注量的关系

图4给出了不同能量质子入射CMOS APS产生的PKA种类及占比。质子能量小于10 MeV时，质子主要通过库仑散射与靶原子核发生弹性碰撞，直接反冲的PKA几乎全部是Si和O，由于硅的原子序数更高、弹性碰撞截面更大，Si-PKA占比远高于O-PKA，此时核反应截面极小，α粒子、氢核等其他PKA占比几乎为0。质子能量在10～100 MeV时，质子与靶原子开始发生核反应，产生α粒子、氢核、质子、中子等次级轻粒子。但仍以Si-PKA为主，同时O-PKA比例略微上升，因为核反应也产生了反冲氧原子。质子能量大于100 MeV时，质子与靶原子发生核反应的截面显著变大，引发靶原子核碎裂，产生大量轻碎片。此时其他种类PKA数目（如Li，Be，B，C等）会显著增加，Si-PKA和O-PKA占比显著下降。PPD单元结构的厚度只有7 μm，远小于1 MeV以上质子

在 SiO_2 和 Si 中的射程，因此在质子能量低于 100 MeV 时，质子能量越高射程越长，与靶原子核发生弹性碰撞的几率越小，因而 PKA 总数随着质子能量的增加而急剧下降。质子在能量高于 100 MeV 后，质子与靶原子主要发生核反应，PKA 总数基本保持不变。

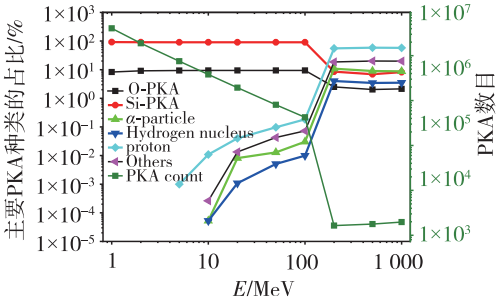


图 4 不同能量质子入射 CMOS APS 产生的 PKA 数量、种类及占比

2.2 PKA 能谱

图 5 为不同能量质子入射 CMOS APS 产生的 PKA 能谱，PKA 能量主要集中在 0.1 MeV 以下。PKA 能量小于 0.1 MeV 时，PKA 数量随质子入射能量增加呈指数下降趋势，随着质子入射能量增加，谱线整体下移，即质子入射能量越高，产生的低能 PKA 数量反而越少。PKA 能量大于 0.1 MeV 时，谱线不再下降，而是变得平坦甚至略有上升，且不同能量的谱线交织在一起。低能入射质子没有足够的能量产生高能的 PKA；高能入射质子表现出明显的“拖尾”现象，表明高能入射质子产生高能 PKA 的能力显著增强。PKA 能量大于 10 MeV 时，谱线变成锯齿状，这是因为高能 PKA 的产生概率很低，模拟中的统计样本较少，导致统计涨落较大。

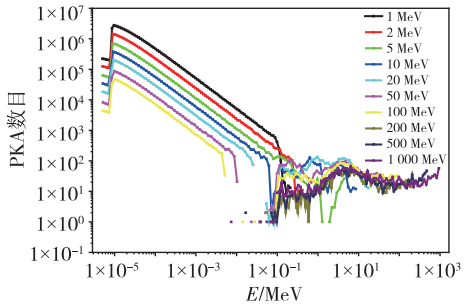


图 5 不同能量质子入射 CMOS APS 的 PKA 能谱

2.3 NIEL 深度分布

图 6 为不同能量质子入射 CMOS APS 沉积的 NIEL 随深度 D 的分布，图 7 为 1，5，10，100 MeV 质子入射 CMOS APS 发生弹性碰撞、非弹性碰撞沉积的 NIEL 随深度的分布。质子能量为 1 MeV 时（图 7(a)），弹性碰撞是 NIEL 的主要贡献者，非弹性碰撞贡献极低，总 NIEL 随深度变化平缓；质子能量为 5 MeV 时（图 7(b)），弹性碰撞仍占主导，但非弹性碰撞的贡献开始显现，总 NIEL 随深度波动增强；质子能量为 10 MeV 时（图 7(c)），弹性与非弹性碰撞的贡献差距缩小，非弹性碰撞的波动更显著，总 NIEL 随深度的波动进一步加剧；质子能量为 100 MeV 时（图 7(d)），非弹性碰撞成为 NIEL 的主要贡献者，弹性碰撞占比下降，总 NIEL 随深度波动剧烈。低能质子的 NIEL 整体较低，且随深度变化相对平缓；高能质子的 NIEL 显著升高，且随深度波动更剧烈，NIEL 的空间分布更不均匀。

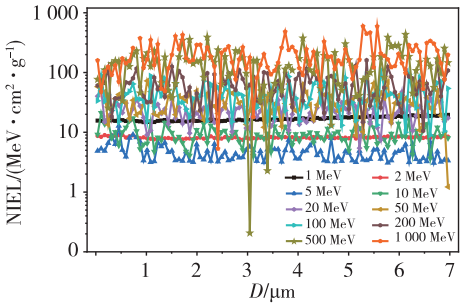
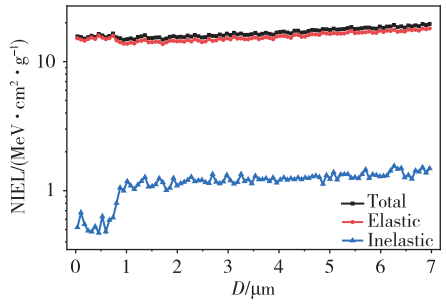
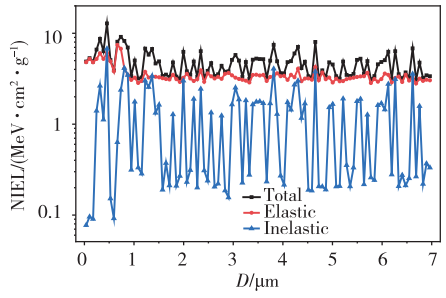


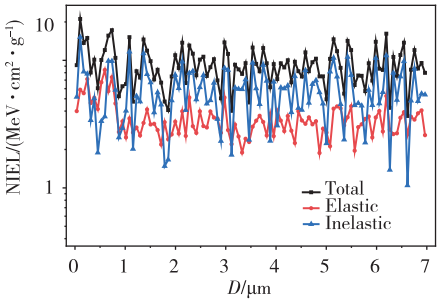
图 6 不同能量质子入射 CMOS APS 沉积的 NIEL 随深度的分布



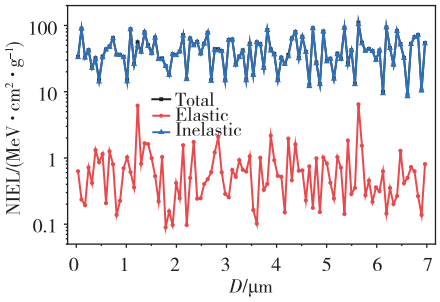
（a）质子能量为 1 MeV



（b）质子能量为 5 MeV



（c）质子能量为 10 MeV



（d）质子能量为 100 MeV

图 7　不同能量质子入射 CMOS APS 发生弹性碰撞、非弹性碰撞沉积的 NIEL 随深度的分布

2.4　N_d 深度分布

图 8 为不同能量质子入射 CMOS APS 产生的 N_d 随深度的分布，图 9 为 1，5，10，100 MeV 质子入射 CMOS APS 发生弹性碰撞、非弹性碰撞产生的 N_d 随深度的分布。质子能量为 1 MeV 时（图 9(a)），弹性碰撞是 N_d 的主要贡献者，非弹性碰撞贡献极低，总 N_d 随深度变化平缓；质子能量为 5 MeV 时（图 9(b)），弹性碰撞仍占主导，但非弹性碰撞的贡献开始显现，总 N_d 随深度波动增强；质子能量为 10 MeV 时（图 9(c)），弹性与非弹性碰撞的贡献差距缩小，非弹性碰撞的波动更显著，总 N_d 随深度的波动进一步加剧；质子能量为 100 MeV 时（图 9(d)），非弹性碰撞成为 N_d 的主要贡献，弹性碰撞占比下降，总 N_d 随深度波动剧烈。低能质子的 N_d 整体较低，且随深度变化相对平缓；高能质子的 N_d 显著升高，且随深度波动更剧烈，缺陷的空间分布更不均匀。

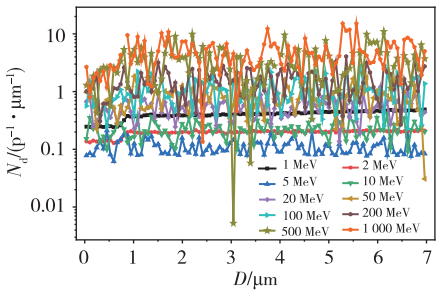
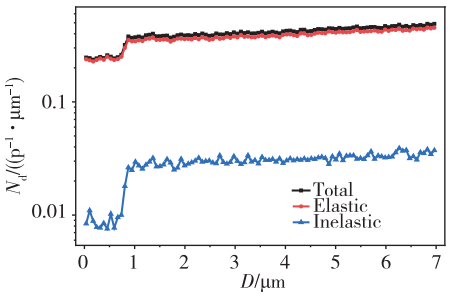
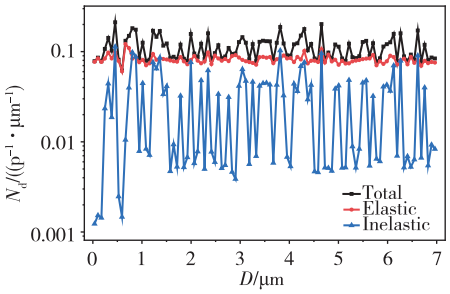


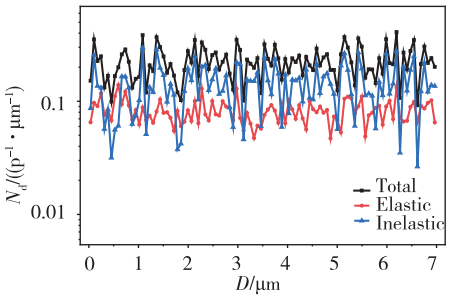
图 8 不同能量质子入射 CMOS APS 产生的 N_d 随深度的分布



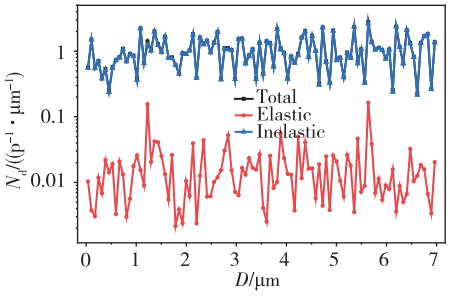
（a）质子能量为 1 MeV



（b）质子能量为 5 MeV



（c）质子能量为 10 MeV



（d）质子能量为 100 MeV

图 9　不同能量质子入射 CMOS APS 发生弹性碰撞、非弹性碰撞产生的 N_d 随深度的分布

2.5　空间站轨道环境质子位移损伤

图 10 为利用 SPENVIS 程序计算得到的空间站轨道质子能谱（轨道近地点 388 km，远地点 398 km，轨道倾角为 41.3°，俘获质子模型选取 AP9）。在 Geant4 中采取图 10 所示质子能谱作为入射质子能量，入射质子注量分别选取 1×10^{10}，1×10^{11}，1×10^{12}，1×10^{13}，1×10^{14} cm^{-2} 进

行模拟。

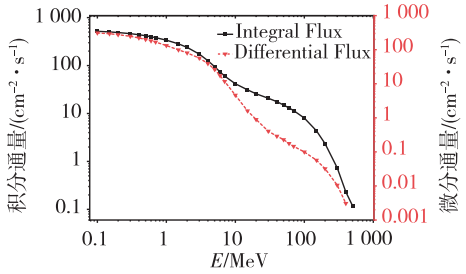


图10 空间站轨道质子能谱

图11为空间站轨道质子入射CMOS APS产生的PKA数量、种类及占比与质子注量的关系，PKA总数随着质子注量呈现线性增长，Si-PKA和O-PKA占比变化不明显，当质子注量为1×10^{14} cm^{-2}时，Si-PKA和O-PKA占比分别为9.1%和90.9%，与1 MeV质子入射产生的Si-PKA和O-PKA占比(8.3%、91.7%)接近。

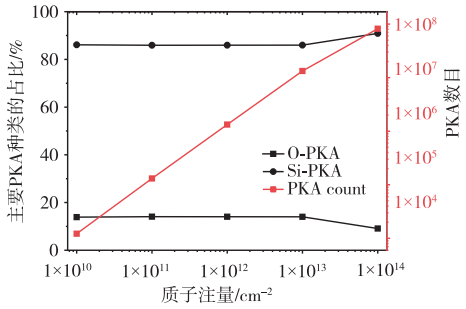


图11 空间站轨道质子入射CMOS APS产生的PKA数量、种类及占比

图12为空间站轨道质子入射CMOS APS产生的PKA能谱，图13给出了质子注量为1×10^{14} cm^{-2}时，1 MeV质子，5 MeV质子和空间站轨道质子入射CMOS APS产生的PKA能谱对比，空间站轨道质子和1 MeV质子入射产生的PKA能谱相近。图14给出了空间站轨道质子入射CMOS APS沉积的NIEL随深度的分布，图15给出了注量为1×10^{14} cm^{-2}的空间站轨道质子入射CMOS APS发生弹性碰撞、非弹性碰撞沉积的NIEL随深度的分布，图16为空间站轨道质子入射CMOS APS产生的N_d随深度的分布，图17给出了注量为1×10^{14} cm^{-2}的空间站轨道质子入射CMOS APS发生弹性碰撞、非弹性碰撞产生的N_d随深度的分布。对比图6～图9发现，空间站轨道质子与1 MeV质子对CMOS APS的位移损伤效果类似，不同的是空间站轨道质子的位移损伤空间分布不均匀，在N区附近存在峰值，而1 MeV单能质子的位移损伤分布比较均匀。

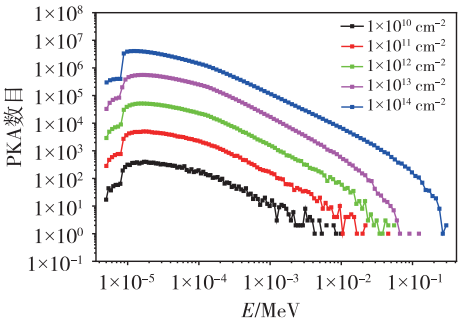


图12 空间站轨道质子入射CMOS APS产生的PKA能谱

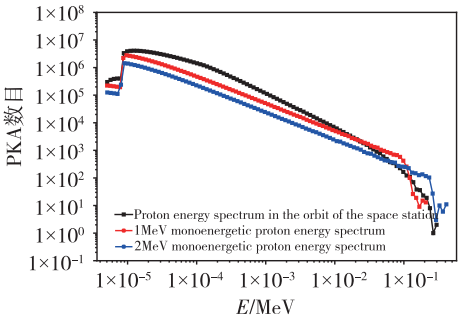


图13 单能质子和空间站轨道质子入射CMOS APS产生的PKA能谱对比

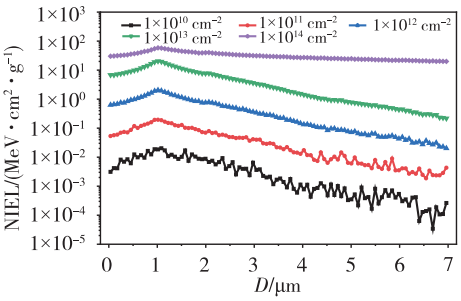


图14 空间站轨道质子入射CMOS APS沉积的NIEL随深度的分布

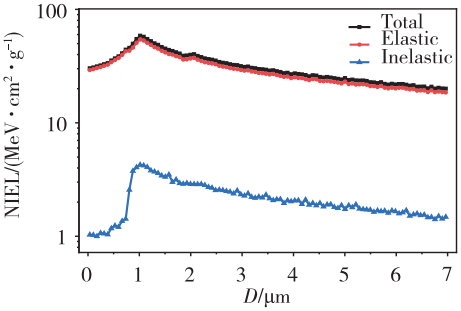


图15 空间站轨道质子入射CMOS APS发生弹性碰撞、非弹性碰撞沉积的NIEL随深度的分布

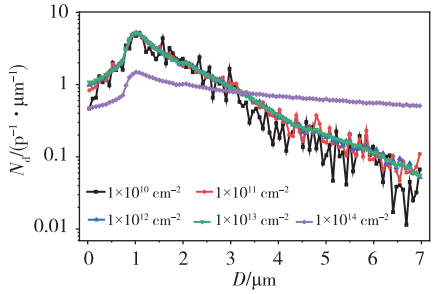


图 16　空间站轨道质子入射CMOS APS产生的N_d随深度的分布

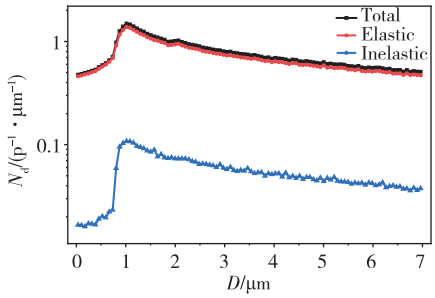


图 17　空间站轨道质子入射CMOS APS发生弹性碰撞、非弹性碰撞产生的N_d随深度的分布

3　结论

本文利用Geant4模拟了1,2,5,10,20,50,100,200,500,1 000 MeV单能质子和SPENVIS程序计算的空间站轨道质子入射CMOS APS的位移损伤,统计了PKA种类及占比、PKA能谱、不同作用类型沉积的NIEL及N_d随深度的分布,得到如下结论:

1)低能入射质子主要产生大量的低能PKA,这些PKA主要负责形成局部的点缺陷;高能入射质子产生的PKA总数较少、能量较高,这些高能PKA可以在CMOS APS中穿行更远,造成级联碰撞,导致更复杂的损伤团簇。

2)低能质子的位移损伤主要由弹性碰撞主导,随深度变化相对平缓,空间分布相对均匀;高能质子的位移损伤主要由非弹性碰撞主导,随深度波动更剧烈,空间分布极不均匀。

3)利用SPENVIS程序计算得到的空间站轨道质子的位移损伤与1 MeV单能质子位移损伤效果相似,但空间站轨道质子的位移损伤空间分布不均匀,在CMOS APS耗尽区存在明显峰值。

参考文献:

[1] 梁　斌, 朱海龙, 张　涛, 等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
Liang Bin, Zhu Hailong, Zhang Tao, et al. Research status and development tendency of star tracker technique [J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 16-29.

[2] 刘嵘侃, 邢德智, 唐昭焕, 等. 低噪声CMOS图像传感器技术研究综述[J]. 半导体光电, 2020, 41(6): 768-773.
Liu Rongkan, Xing Dezhi, Tang Zhaohuan, et al. An overview of low noise CMOS image sensor technique [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(6): 768-773.

[3] 王祖军, 林东生, 刘敏波, 等. CMOS有源像素图像传感器的辐照损伤效应[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 945-950, 982.
Wang Zujun, Lin Dongsheng, Liu Minbo, et al. Radiation damage effects on the CMOS active pixel sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 945-950, 982.

[4] 唐欣欣, 罗文芸, 王朝壮, 等. 低能质子在半导体材料Si和GaAs中的非电离能损研究[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 1266-1270.
Tang Xinxin, Luo Wenyun, Wang Chaozhuang, et al. Non-ionizing energy loss of low energy proton in semiconductor materials Si and GaAs[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(2): 1266-1270.

[5] 王祖军, 杨　勰, 赖善坤, 等. CMOS图像传感器中子位移辐照损伤效应仿真模拟研究[J]. 现代应用物理, 2022, 13(3): 150-157.
Wang Zujun, Yang Xie, Lai Shankun, et al. Simulation of displacement damage of CMOS image sensors irradiated by neutron[J]. Modern Applied Physics, 2022, 13(3): 150-157.

[6] 杨　勰, 王祖军, 尚爱国, 等. 质子辐照下4T CMOS图像传感器满阱容量退化模拟研究[J]. 现代应用物理, 2021, 12(3): 133-141.
Yang Xie, Wang Zujun, Shang Aiguo, et al. Simulation of full well capacity degradation of 4T CMOS image sensor irradiated by proton [J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 133-141.

[7] 王祖军, 赖善坤, 杨　勰, 等. CMOS图像传感器辐照损伤效应仿真模拟研究进展[J]. 半导体光电, 2022, 43(5): 839-847.
Wang Zujun, Lai Shankun, Yang Xie, et al. Simulation research progress of radiation damage effects on CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(5): 839-847.

[8] Wang Z, Xue Y, Chen W, et al. Comparison of the dark signal degradation induced by Gamma ray, proton, and neutron radiation in pinned photodiode CMOS image sensors [J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(6): 69403.

[9] Wang Z, Xue Y, Wang Z, et al. Degradation analysis of the pinned photodiode CMOS image sensors induced by energetic proton radiation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 1058: 168784.

[10] 罗智文, 冯　婕, 郭　旗, 等. 质子辐照下动态星敏感器质心定位[J]. 光学 精密工程, 2025, 33(13): 2089-2107.
Luo Zhiwen, Feng Jie, Guo Qi, et al. Centroid localization of dynamic star sensors under proton irradiation[J]. Optics and

Precision Engineering, 2025, 33(13): 2089-2107.

[11] 王祖军，薛院院，刘卧龙，等. CMOS图像传感器西安200 MeV质子应用装置H^-辐照效应实验研究[J]. 现代应用物理, 2021, 12(3): 126-130, 139.
Wang Zujun, Xue Yuanyuan, Liu Wolong, et al. H^- beams irradiation effect of CMOS image sensor at Xi'an 200 MeV proton application facility [J]. Modern Applied Physics, 2021, 12(3): 126-130, 139.

[12] 王祖军. CMOS图像传感器辐照损伤效应试验方法[J]. 半导体光电, 2025, 46(1): 180-188.
Wang Zujun. Test methods for radiation damage effects on CMOS image sensors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(1): 180-188.

[13] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4—a simulation toolkit [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3): 250-303.

[14] Jun I. Effects of secondary particles on the total dose and the displacement damage in space proton environments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001, 48(1): 162-175.

[15] 杨 勰, 霍勇刚, 王祖军, 等. 位移损伤诱发CMOS图像传感器电荷转移损失退化的理论模拟研究[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 273-281.
Yang Xie, Huo Yonggang, Wang Zujun, et al. Theoretical simulation of charge transfer loss degradation of CMOS image sensor induced by displacement damage [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 273-281.

[16] Walters R J, Messenger S R, Cotal H L, et al. Electron and proton irradiation-induced degradation of epitaxial InP solar cells[J]. Solid-State Electronics, 1996, 39(6): 797-805.

[17] Robinson M, Torrens I. Computer simulation of atomic-displacement cascades in solids in the binary-collision approximation[J]. Physical Review B, 1974, 9(12): 5008-5024.

[18] Akkerman A, Barak J, Chadwick M B, et al. Updated NIEL calculations for estimating the damage induced by particles and γ-rays in Si and GaAs[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2001, 62(4): 301-310.

[19] Akkerman A, Barak J. Partitioning to elastic and inelastic processes of the energy deposited by low energy ions in silicon detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 260(2): 529-536.

[20] Nordlund K, Zinkle S J, Sand A E, et al. Improving atomic displacement and replacement calculations with physically realistic damage models[J]. Nature Communications, 2018, 9: 1084.

[21] Jun I, Xapsos M A, Messenger S R, et al. Proton nonionizing energy loss (NIEL) for device applications [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(6): 1924-1928.

作者简介：

王盆生(1996—)，男，青海省西宁市人，硕士研究生，主要从事光电器件与系统辐照损伤效应及应用研究；

王祖军(1979—)，男，湖北省汉川市人，博士，研究员，主要从事光电器件与系统辐照损伤效应及应用研究。