0254-6124/2011/31(6)-800–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yu Hao, Wang Zhiqiang, Wang Wenbin, Liu Wei. A solution of displacement damage evaluation on silicon chip under space environment. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(6): 800-807

一种评估空间环境下半导体材料损伤的模拟方法

于 颢[1,2] 王治强[1] 王文彬[1] 刘 薇[1]

1(中国科学院光电研究院 北京100190)

2(中国科学院研究生院 北京100049)

摘 要 提出了一种模拟空间环境下半导体材料晶格损伤速率的方法, 计算了 375 km 轨道高度不同纬度空间位置的飞行器模型中硅片产生晶格损伤的速率. 本方法考虑了宇宙射线的质子、正负电子、中子和 γ 射线成分, 建立了简单的多层飞行器结构模型, 并通过模拟给出了芯片上氖、氘、氚、氦、正负电子、正负 π 介子、γ 射线及中子的损伤结果. 相比给出材料中的非电离能量损失, 更进一步给出了晶格损伤的产生速率, 为半导体器件的可靠性评估提供了进一步的参考数据.

关键词 辐射影响, 晶格损伤, 蒙特卡洛模拟, 空间环境

中图法分类号 V 524

A Solution of Displacement Damage Evaluation on Silicon Chip Under Space Environment

YU Hao[1,2] WANG Zhiqiang[1] WANG Wenbin[1] LIU Wei[1]

1(*Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract A method of displacement damage simulation under space environment is presented. This simulation of silicon lattice displacement damage rate is used for low Earth orbit satellite application. In this application, altitude was set for 375 km as a typical variable. Through the simulation, displacement damage rates of different geomagnetic latitude orbital positions were given, which is useful for evaluating reliability of semiconductor devices on spacecraft. And displacement damage rates of different geomagnetic latitude orbital positions were compared, which is useful for orbit design. Diverse particles caused displacement damage are concerned, such as Gamma, electron, positron, pi+, pi−, proton, deuterium, tritium, helium and aluminum. The main displacement damage source is proton, which is part of cosmic ray or secondary particle from the shell of spacecraft. Compared with None Ionizing Energy Lost (NIEL), this result is given by "density of displacement damage in silicon crystal", which is a useful way to evaluate defects of semiconductor device or solar cells, in turn more helpful for engineers.

Key words Radiation effects, Displacement damage, Monte-Carlo simulation, Space environment

2010-04-29 收到原稿, 2011-06-20 收到修定稿

E-mail: yuhaoee@gmail.com

1 引言

空间环境辐射对飞行器上电子器件的可靠性有很大影响, 特别是对于辐射敏感的光电器件, 其辐射可靠性问题更为突出. 可靠性评估分为实验和模拟两种研究方法 [1,4−8]. 目前, 比较流行的模拟方法是通过计算得出芯片中的非电离能量沉积 (NIEL). 相比单纯计算非电离能量沉积, 本文提出的方法给出了空位产生的速率, 这更有利于估算辐射造成的晶格损伤 (displacement damage).

器件的辐射可靠性可分为单粒子效应、总剂量效应和晶格损伤等方面的问题. 晶格损伤是指形成半导体器件的单晶硅或砷化镓等半导体材料, 由于辐射使一些原子受到冲击离开原始晶格位置形成的空位–间隙原子对 [1] (Frenkel pair), 以及级联效应造成的小范围非晶区域. 本文关注晶格损伤的模拟计算, 造成晶格损伤的入射粒子能量沉积属于非电离能量沉积, 而非电离能量沉积包括产生声子和造成晶体损伤两部分 [2]. 靶原子的反冲能如果小于产生晶格损伤的能量阈值 (displacement damage threshold), 能量会以声子的形式传播 [2], 如果大于能量阈值, 靶原子则会离开原位形成间隙原子并留下空位, 如果其具备较高的能量, 会造成级联反应, 将更多的原子撞离原本的晶格位置. 该过程中, 存在一种逆过程, 获得能量的反冲核离开晶格位置回填到其他空位处, 即空位被硅原子重新占据, 这一过程并未造成新的空位 (vacancy), 该过程将会使晶格损伤的产生削弱 30% 左右 [2].

利用非电离能量沉积评估晶格损伤的方法 [3], 可以通过实验获得的位移损伤因子 (displacement damage factor) 评估不同能量的不同粒子造成的损伤. 本文通过直接构建空间辐射环境、飞行器模型、硅片模型, 基于蒙特卡洛模拟方法, 获得了硅片上晶格损伤产生的速率, 相比利用损伤因子估算, 结果更精确.

2 模拟方法

主要采用的两种工具为 GEANT 4[9] 和 SRIM. 随着高能物理实验广度和复杂度的不断增加, 模拟工作成为高能物理研究的重要手段, 因此 GEANT 软件不断完善, 应用日趋广泛, 其结果的精确性已经在很多领域中得到认可及验证. SRIM 是一组用来计算材料对粒子的阻止作用以及粒子在材料中的射程和损伤的程序 [2]. SRIM 具备计算晶格损伤的功能.

2.1 仿真模型

2.1.1 几何模型

如图 1 所示, 飞行器模型由母体、外壳、内壳、芯片和封装层组成. 最外层立方体代表母体, 为 GEANT 4 定义的物理场景的有效范围, 尺寸为 $1.2\,\mathrm{m}\times1.2\,\mathrm{m}\times1.2\,\mathrm{m}$. 中间两层盒子为两层 3 mm 厚铝板, 代表飞行器的外壳和机箱壳, 尺寸分别为 $1\,\mathrm{m}\times1\,\mathrm{m}\times1\,\mathrm{m}$ 和 $40\,\mathrm{cm}\times40\,\mathrm{cm}\times40\,\mathrm{cm}$. 中间片为包裹 0.1 mm 厚度 SiO_2 层的硅单质薄片, SiO_2 层代表陶瓷封装层, 硅单质代表芯片, 尺寸为 $100\,\mathrm{mm}\times100\,\mathrm{mm}\times0.5\,\mathrm{mm}$. 将硅片的横向尺度做大是为了增加收集到粒子的数目, 提高仿真效率, 最后需要进行归一化处理.

SRIM 模拟中, 硅片尺寸设置为 $4\,\mathrm{mm}\times4\,\mathrm{mm}\times0.5\,\mathrm{mm}$. 实现方式为, 将靶设置为 4 mm 深度, 从输出的 Vacancy.txt 文件中取 0∼0.5 mm 的数据处理.

2.1.2 反冲核能量计算

正负电子、γ 射线、正负 π 介子入射硅材料, 利用 GEANT 4 计算反冲核能量, 基本方法是利用动量守恒. 共考虑 4 种造成反冲的效应, 包括光电效应、光子在核场中的电子对产生、轫致辐射及库仑散射. 这里以轫致辐射为例具体说明如何实现反冲核能量计算.

如图 2 所示, 入射粒子为 e^-, 产生的次级粒子为 γ, 入射粒子 γ 的动量减去出射粒子 γ 的动量和

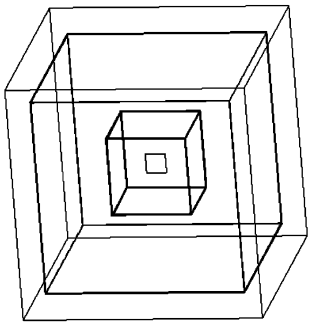


图 1 仿真几何模型

Fig. 1 Geometry model

电子的动量为反冲硅的动量, 即

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{SiR}} = \boldsymbol{P}_{\mathrm{ig}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{sg}} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{se}}. \tag{1}$$

其中, $\boldsymbol{P}_{\mathrm{SiR}}$ 为硅的反冲动量, $\boldsymbol{P}_{\mathrm{ig}}$ 为入射 γ 的动量, $\boldsymbol{P}_{\mathrm{sg}}$ 为出射 γ 的动量, $\boldsymbol{P}_{\mathrm{se}}$ 为出射电子的动量, 进而得到的动能为

$$E_k = \sqrt{(P^2 + m_0^2c^4)} - m_0c^2 - 15\,\mathrm{eV}. \tag{2}$$

其中, P 为动量, m_0 为静止质量, c 为光速. 15 eV 代表硅晶体产生空位的阈值能量 [2]. 对于有两个次级粒子的电子对产生过程, 即光子在核场中的电子对产生过程, 或没有次级粒子的库仑散射过程, 也可以利用同样方法. 在计算核反冲后, 将反冲硅原子的动能、位置和角度记录在 TRIM.dat 文件中, 以便下一步使用.

2.1.3 中子损伤的估算方法

中子损伤的估算是通过质子和中子的非电离能量沉积及位移损伤因子 [3] 进行的, 中子造成的损伤数为

$$D_{\mathrm{n}} = V_{\mathrm{p}}(N_{\mathrm{n}}/N_{\mathrm{p}})(D_{\mathrm{fn}}/D_{\mathrm{fp}}). \tag{3}$$

其中, D_{fn} (displacement damage factor) 为入片中子的损伤因子; D_{fp} 为入片质子的损伤因子, 该因子根据入片粒子能谱以及其位移损伤因子随能量变化曲线加权平均得到; V_{p} 为质子在芯片内造成空位的产生率; N_{n} 和 D_{p} 分别为中子和质子的非电离能量沉积. 位移损伤因子取值见参考文献 [3].

2.1.4 空间辐射环境模型

本文将低地球轨道的辐射源分为质子、γ 射线 [10,17]、正负电子、中子和重核 [10]. 其中, 重核由于外壳屏蔽, 基本没有机会击中芯片, 所以在模拟中没有考虑. 质子分为原初质子 [12] 和与大气反应的次级质子 [13]; 正负电子根据能段分为高能电子和高能正电子及低能电子和低能正电子 [19], 高能电子由次级正负电子 [13] 及原初正负电子构成 [14]; 中子由于寿命很短, 主要成分为宇宙射线与大气反应形成的次级粒子 [14,16]. 南大西洋异常区被单独处理, 在该区域采用了 AP-8 和 AE-8 模型. 还考虑了太阳周期、地磁场影响、地球遮挡等影响因素. 太阳周期按太阳高年计算. 低地球轨道受地磁场影响较大, 主要体现在不同纬度的地磁刚度不同上, 地磁刚度对低于该刚度的粒子有截断作用. 地球遮挡表达的是, 对弥散在宇宙中的射线, 由于地球的遮挡, 会有一个角度不受该种辐射源的照射, 如图 3 所示. 弥散光子、原初质子和原初正负电子都存在这个问题.

这里仅以原初质子为例介绍空间环境模型的构造, 其余粒子源可参考文献 [10].

宇宙弥散光子为各向同性的辐射源, 模拟中采用 cosine law 采样 [10], 其能谱分布如下:

$$\begin{aligned} F(E,t) &= A(E)\sin\omega(t-t_0) + B(E),\\ A(E) &= 0.5[f_{\min}(E) - f_{\max}(E)],\\ B(E) &= 0.5[f_{\min}(E) + f_{\max}(E)]. \end{aligned} \tag{4}$$

其中, $f_{\min}(E)$ 为太阳低年的质子能谱, $f_{\max}(E)$ 为太阳高年的质子能谱. 表 1 给出了两能谱未经过地磁刚度修正的表达式 [12].

经过地磁截止刚度修正后的表达式为 [10]:

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}E} = P(E)\frac{1}{1+\left[\dfrac{R(E)}{R_{\mathrm{c}}}\right]^{-12.0}}, \tag{5}$$

单位为 $(\mathrm{m}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{sr}^{-1}\cdot\mathrm{MeV}^{-1})$, $P(E)$ 为未经修正的原初质子能谱 (见表 1).

式 (5) 中, $R(E)$ 为粒子刚度, 其表达式为 [16]:

$$R(E) = \frac{APC}{Ze}. \tag{6}$$

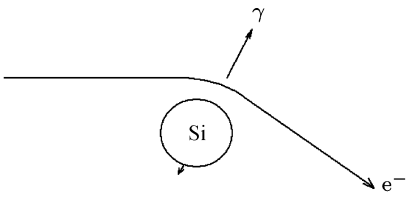


图 2 韧致辐射示意

Fig. 2 Bremsstrahlung

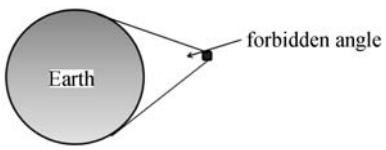


图 3 地球遮挡角示意

Fig. 3 Forbidden angle

表 1 原初质子能谱

Table 1 Universal proton spectrum

solar activity	$\frac{\mathrm{d}N(E)}{\mathrm{d}E}/(\mathrm{cm}^{-2}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{sr}^{-1}\cdot\mathrm{MeV}^{-1})$	energy range/MeV
solar minimum	$7.85\times10^{-7}E^{1.00}$	40.0∼193
	$1.29\times10^{-4}E^{0.04}$	193∼ 565
	$2.25\times10^{-1}E^{-1.14}$	$565\sim3.44\times10^{3}$
	$3.44\times10^{2}E^{-2.04}$	$3.44\times10^{3}\sim2.55\times10^{4}$
	$2.44\times10^{5}E^{-2.69}$	$2.55\times10^{4}\sim1\times10^{6}$
solar maximum	$2.45\times10^{-6}E^{-0.27}$	$35.6\sim102$
	$9.14\times10^{-8}E^{0.98}$	$102\sim491$
	$4.97\times10^{-5}E^{-0.04}$	$491\sim1.21\times10^{3}$
	$2.54\times10^{-3}E^{-0.59}$	$1.21\times10^{3}\sim3.44\times10^{3}$
	$3.44\times10^{2}E^{-2.04}$	$3.44\times10^{3}\sim2.55\times10^{4}$
	$2.44\times10^{5}E^{-2.69}$	$2.55\times10^{4}\sim1\times10^{6}$

定义 R_c 为地磁截止刚度, 其表达式为 [10]:

$$R_\mathrm{c}=14.9\times\left(1+\frac{h}{R_\mathrm{e}}\right)^{-2}\times(\cos\theta_\mathrm{M})^4. \qquad (7)$$

单位为 GV, θ_M 为地磁纬度, 即以地磁场的南北极为准的纬度 (本文中所有纬度均指地磁纬度).

图 4 所示为根据该能谱采样得到的太阳高年原初质子在不同空间位置的能谱, 这里轨道高度均为 375 km.

如图 4 所示, 纬度越低, 地磁截止刚度越高, 粒子能谱的分布也就越偏向高能, 粒子的总流量也越低.

2.2 系统构成

仿真系统如图 5 所示, 具体模拟过程如下.

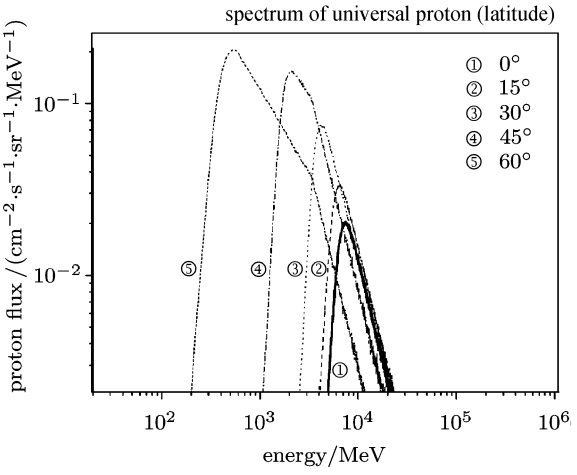


图 4 不同纬度的原初质子能谱

Fig. 4 Spectrum of proton on different latitude

(1) 利用 GEANT 4 程序产生空间辐射环境, 模拟宇宙射线与飞船壳体和芯片封装层作用的屏蔽效果及次级粒子产生, 收集进入芯片的各种粒子 (本文中称为入片粒子).

(2) 入片粒子计算分为三部分, 即将质子、氘、氚、氦核、铝核以 TRIM.dat 文件的形式送给 SRIM 计算; 宇宙弥散光子、正负电子、正负 π 介子送给 GEANT 4 计算反冲的模块, 计算得到 PKA (Primary Knock-on Atom)[1], 记录在 TRIM.dat 文件中; 中子损伤采用式 (2) 估算.

(3) 利用 SRIM 计算氕、氘、氚、氦、铝在硅晶体中产生的损伤; 利用 SRIM 计算宇宙弥散光子、正负电子、正负 π 介子造成反冲的 PKA 硅原子所产生的级联碰撞 (cascade) 进一步产生的晶格损伤.

(4) 归一化处理数据.

3 仿真结果

利用该模拟方法, 计算 375 km 高度, 0°, 15°, 30°, 45°, 60° 五个地磁纬度以及南大西洋辐射带共六个不同空间位置的能量沉积以及晶格损伤的产生速率.

硅片单位体积上的电离能量沉积和非电离能量沉积如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 无论是电离能量沉积还是非电离能量沉积, 都随着纬度升高而有所增加, 这是由于纬度越高, 地磁截止刚度越小, 从而粒子总流量越大. 南大西洋辐射带 [10] 的辐射量很大, 所

以能量沉积要明显高于非南大西洋辐射带区.

图 7 给出了氕、氘、氚、氦的入片粒子流量, 图 8 给出了氕、氘、氚、氦在硅片中产生空位的速率.

射入芯片的氕、氚、氦是入射粒子和屏蔽的铝壳发生强相互作用的产物, 这些产物还包含极少量的氧和碳, 以及脱离外壳的铝等, 由于量太少, 这里没有讨

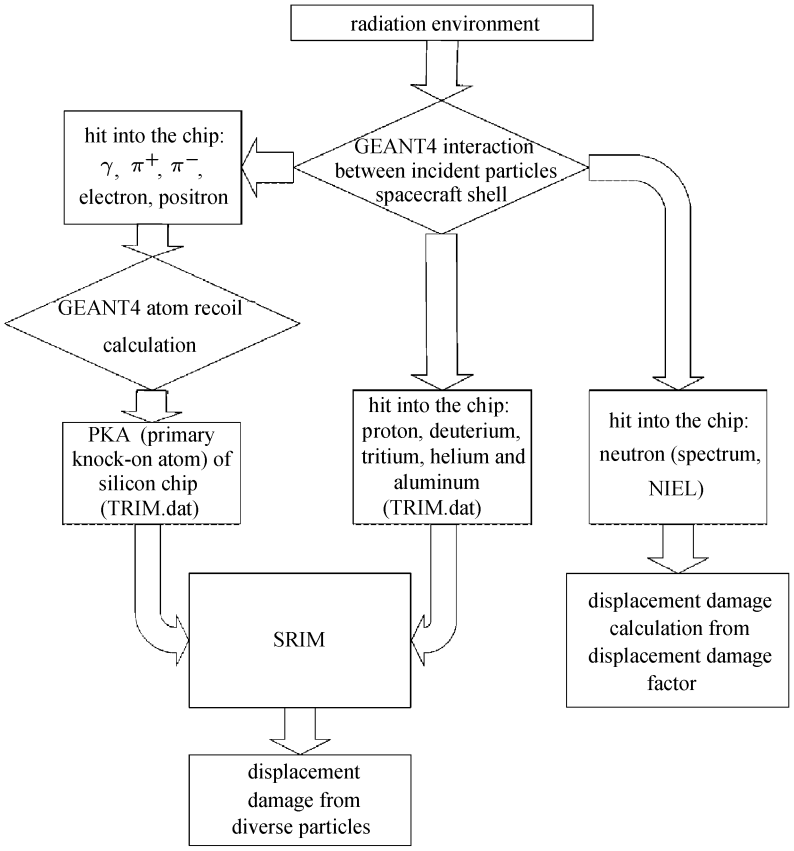


图 5 仿真系统构成

Fig. 5 Simulation system

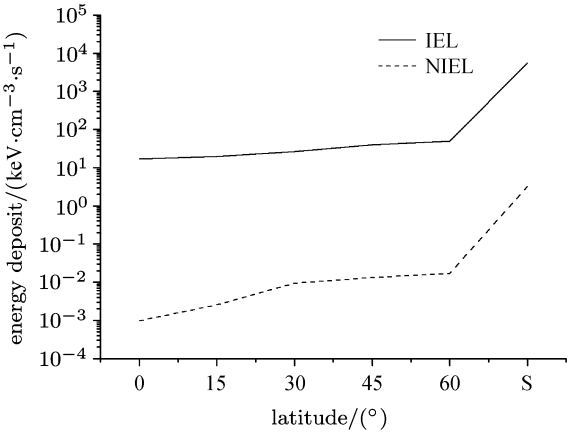


图 6 能量沉积随纬度的变化

Fig. 6 Energy deposit on different latitude

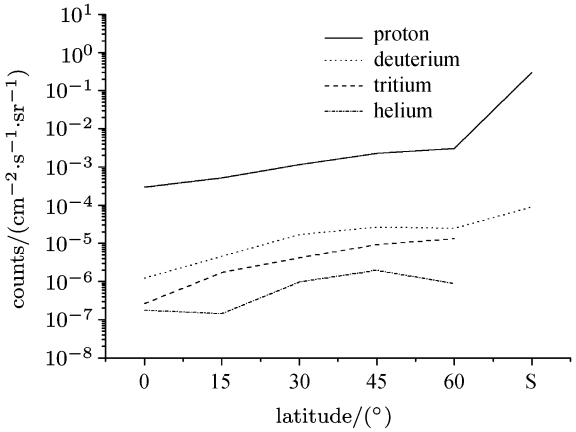


图 7 入片的质子、氘、氚、氦核流量

Fig. 7 Flux on chip of proton, deuterium, tritium and helium on different latitude

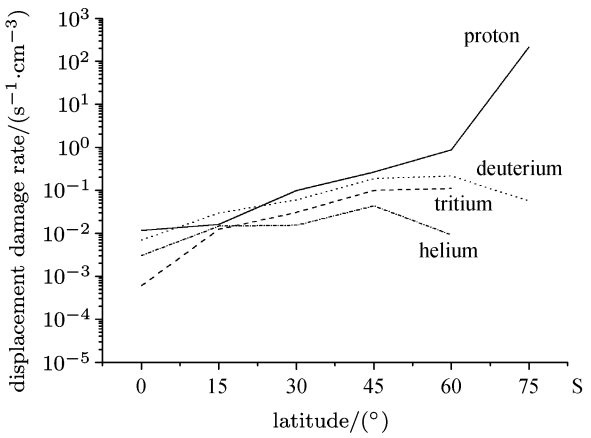


图 8 质子、氘、氚、氦核在硅片中产生空位的速率

Fig. 8 Displacement damage rate of proton, deuterium, tritium and helium on different latitude

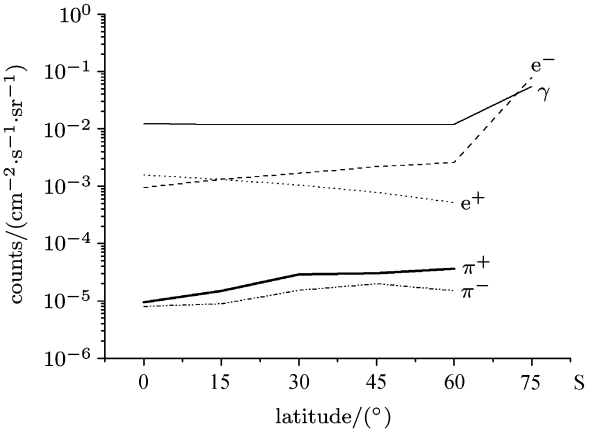


图 9 入片的 γ 射线、正负电子、正负 π 介子的流量

Fig. 9 Flux on chip of γ, e^-, e^+, π^- and π^+ on different latitude

论. 而质子除强相互作用的产物外, 大部分是穿过外壳进入舱内的宇宙射线成分.

可以看到, 氘、氚、氚的流量都是随着纬度的升高而增大的, 这是因为纬度越高, 总流量越大, 如图 7 所示. 而氦的流量在纬度 60° 时降低了, 这是由于采样量小造成的统计涨落. 60° 纬度空间位置的质子谱, 其高能部分成分降低, 所以在模拟过程中, 强相互作用发生的概率变小, 造成了采样量小, 统计涨落增大.

南大西洋辐射带区质子和氘的流量很大, 但是氚与氦并未收集到, 这是因为这一地区所采用的空间环境模型为 AP-8, 质子的能量范围在 100 ~ 400 MeV[10], 相比较 0° 纬度空间位置, 质子能量 10^4 MeV 的成分要大很多, 南大西洋辐射带区质子相对比较其他空间位置能量在 10 MeV 量级占大多数, 模拟中可发生强相互作用的概率较低, 其产物氘、氚、氦成分也就较少.

氘、氚、氚、氦的损伤产生速率随纬度变化趋势与入片流量基本一致. 可以看到, 氘、氚、氦的流量相对质子低很多, 但产生的损伤在某些空间位置水平相当, 这是因为带电量越大、静止质量越大的粒子产生损伤的能力越强.

图 9 为 γ 射线、正负电子、正负 π 介子的入片粒子流量, 图 10 为 γ 射线、正负电子、正负 π 介子的入片粒子在硅片中产生空位的速率.

射入芯片的 γ 射线和正负电子的主要来源除了穿过屏蔽的宇宙射线外, 相当一部分是入射粒子与外

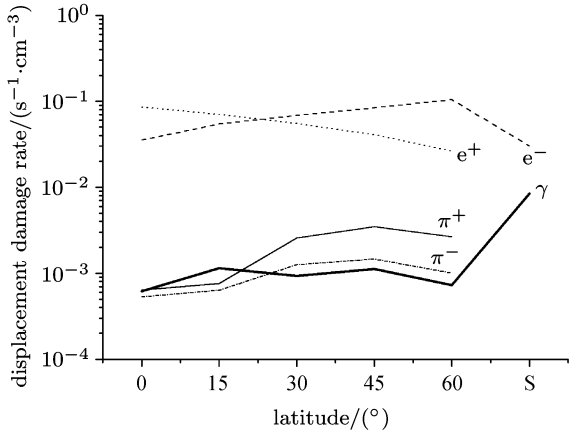


图 10 γ 射线、正负电子、正负 π 介子在硅片中产生空位的速率

Fig. 10 Displacement damage rate of γ, e^-, e^+, π^- and π^+ on different latitude

壳发生相互作用产生的次级粒子. 这些相互作用包括光电效应产生次级电子, γ 射线在核场中正负电子对的产生, 带电粒子轫致辐射产生的 γ 射线, 以及正负电子湮灭产生的 γ 射线等. 正负 π 介子来源于高能质子和外壳的强相互作用.

从流量上来看, γ 射线比质子高 1 个数量级 (见图 7 和图 9), 而电子、正电子与质子相当, 正负 π 介子的成分较少. 对飞行器造成影响的 γ 射线的主要来源于宇宙弥散光子[10], 由于 γ 射线不带电, 所以其流量不受地磁刚度影响, 也就不随地磁纬度变化, 又由于正负电子的流量总和并未随纬度而产生很大变化, 所以次级 γ 流量也基本不随纬度发生变化, 致使入

片的 γ 射线总流量基本保持不变. 正负电子随着纬度变化呈现出此消彼长的态势, 这是因为根据 AMS 的测量报告, 正负电子的成分随着纬度变化呈现此消彼长的态势, 而其总和保持稳定 [10]. 正负 π 介子的流量随着质子流量的提高而提高.

γ 射线的损伤比较低是因为弥散光子的能量比较低, 大多数在 keV 量级, 并且在模拟实验中观察到, 造成晶格损伤的主要作用是库仑散射, γ 射线产生的晶格损伤相当一部分也由次级电子的库仑散射造成, 光电效应或康普顿散射作用传递给原子核的能量相比带电粒子要低很多. 正负电子产生晶格损伤的速率与质子在同一数量级, 其量级为 $0.1\,\mathrm{s^{-1}\cdot cm^{-3}}$, 而 π 介子由于流量较小, 产生的损伤数也比较小.

图 11 为入片中子的流量, 图 12 为入片中子在硅片中产生空位的速率. 由于中子的寿命很短, 低地球轨道的中子来源主要为太阳产生的中子以及宇宙射线与大气发生相互作用产生的次级中子, 这些成分的总流量相比质子的流量仍然微乎其微. 质子在 0° 纬度, 375 km 高度的流量为 $0.020\,432\,7\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}\cdot MeV^{-1}}$, 而中子流量在 $10^{-12}\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot sr^{-1}\cdot MeV^{-1}}$ 数量级, 这使得入片的中子主要来源于高能质子与外壳发生的强相互作用产物. 因此, 中子的流量是随着质子流量变化而变化的, 由图 11 可知, 纬度于 45° 至 60° 之间的流量没有明显差别, 这是由于在该纬度范围内, 质子能谱的成分变化主要在于低能段成分增加, 而高能段保持不变, 所以, 发生强相互作用产生的次级中子的流量保持不变.

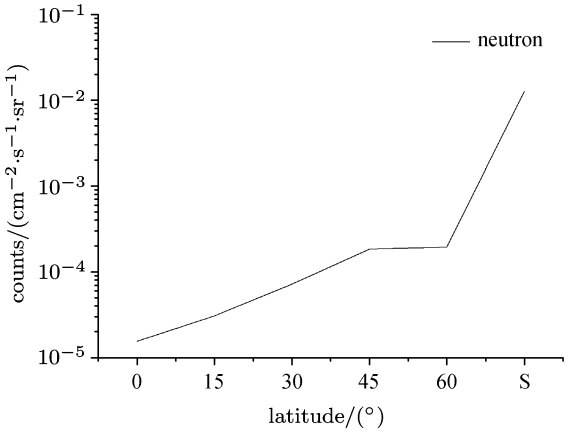


图 11 入片中子的流量

Fig. 11 Flux on chip of neutron on different Latitude

南大西洋辐射带区的质子流量非常大, 其产生的次级中子流量亦很高. 中子产生的损伤比质子要高两个数量级, 次级中子是低地球轨道飞行器内部芯片产生晶格损伤的主要原因. 从其损伤随空间位置的变化曲线可以看出, 中子的损伤与其流量曲线并不完全吻合, 而与质子损伤的变化趋势吻合更好. 这说明, 利用位移损伤因子估算的中子损伤的准确性相比蒙特卡洛方法的直接模拟结果要粗略得多.

由于中子是产生晶格损伤的主要原因, 而中子的主要成分是高能质子产生的次级粒子. 所以, 在一定厚度内, 外层屏蔽越厚, 可能会产生越多次级粒子, 使得内部包裹的芯片受到更高损伤. 为验证该假设, 进行了一组对比试验, 在 0° 纬度空间位置, 模型内壳分别为 0 mm, 3 mm, 6 mm, 10 mm, 15 mm 厚铝板时, 硅片上收集到的中子数比例为 85:178:351:528:886. 由于中子穿透性很强, 在空间环境下, 高能粒子流量较大, 在一定厚度内, 外壳越厚, 其内部芯片上晶格损伤 (空位) 的产生速率反而越大.

4 结论

随着纬度的提高, 飞行器中芯片上晶格损伤 (空位) 的产生速率越大, 辐射的总剂量积累使得芯片永久失效的可能性越高, 南大西洋异常区的辐射量要远大于其他地区.

根据计算结果, 若忽略退火因素, 飞行器在 0° 纬度 375 km 轨道高度的空间位置停留 1 年后, 产生的

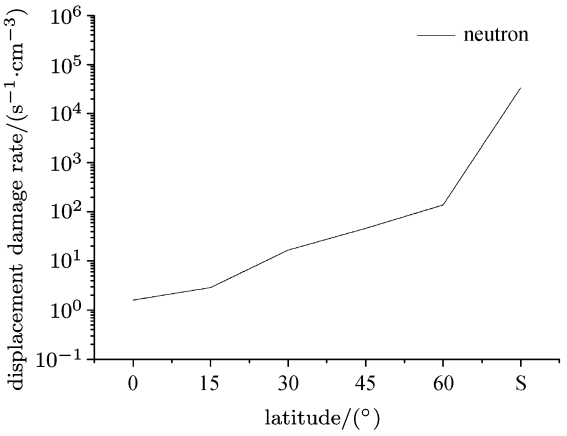


图 12 中子在硅片中产生空位的速率

Fig. 12 Displacement Damage Rate of neutron on different Latitude

总空位数约为 $5.53\times10^7\,\mathrm{cm}^{-3}$, 而晶圆片出厂的原始缺陷在 $10^5\sim10^6\,\mathrm{cm}^{-3}$ 之间; 当考虑退火时, 总空位数虽然会减少, 但辐射造成的晶格损伤仍会对空间环境下半导体器件的可靠性产生很大影响.

次级中子是造成芯片位移损伤的主要因素. 因此, 在飞行器设计中, 对位移损伤敏感的光电器件应当远离大质量单位, 减少次级粒子的影响.

致谢 中国科学院高能物理研究所吴枚研究员和李刚同志对本文实验给予了指导和帮助. 北京化工大学邵晓红教授在实验过程中参与了讨论.

参考文献

[1] Srour J R, Cheryl J. Marshall, and Paul W. Marshall, 2003. Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **50**(3):653-669

[2] James F Ziegler, Jochen P Biersack, Matthias D Zeigler. SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter [M]. Oxford: Pergamon Press, 2008. 11-21-11-29

[3] Lindstrom G, Moll M, Fretwurst E. Radiation hardness of silicon detectors–A challenge from high energy physics [R]//International Conference on Radiation Effects on Semiconductor Materials, Detectors and Devices. 1998

[4] Wang Chaozhang, Luo Wenyun, Zha Yuanzi. Monte-Carlo simulation of optimization choice of shielding materials for proton radiation in space [J]. *Radiat. Prot.*, 2007, **27**(2):79-86. In Chinese (王朝壮, 罗文芸, 查元梓. 空间质子屏蔽材料优化选择的蒙特卡罗模拟 [J]. 辐射防护, 2007, **27**(2):79-86)

[5] Yu Qingkui, Tang Min, Zhu Hengjing. Evaluation of CCD reliability under 10 MeV proton and Co 60 radiation [J]. *Spacec. Env. Eng.*, 2008, **25**(4):391-396. In Chinese (于庆奎, 唐民, 朱恒静. 用 10 MeV 质子和钴 60 γ 射线进行 CCD 空间辐射效应评估 [J]. 航天器环境工程, 2008, **25**(4):391-396)

[6] Dale C, Marshall P, Cummings B, *et al.* Displacement damage effects in mixed particle environments for shielded spacecraft CCD [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1628-1637

[7] Samwel S W, Hady A A, Mikhail J S. Studying the total ionizing dose and displacement damage dose effects for various orbital trajectories [G]//First Middle East and Africa IAU-Regional Meeting, Proceedings MEARIM 1, 2008

[8] Fu Hongyong, Lin Baojun, Chen Fuen. Comprehensive reliability assessment of high reliable space electronic products based on general failure rate [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(3):250-252. In Chinese (伏洪勇, 林宝军, 陈福恩. 一种基于通用失效率的航天设备可靠性评估算法 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(3):250-252)

[9] Agostinelli S, *et al.* GEANT 4: A simulation toolkit [M/OL]. *Nucl. Inst. Meth.*, 2003. http://cern.ch/geant4

[10] Gang Li. Calculation for the space environment background of HXMT [J]. *Chin. Astron. Astrophys.*, 2005, **33**(3):333-346

[11] Gehrels N. Instrument background in Gamma Ray spectrometers flown in low Earth orbit [J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, 1992, **A313**:513-528

[12] Du Heng, Ye Zonghai. Space Environment for Low Earth Orbit Spacecraft [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996:402. In Chinese (都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996:402)

[13] AMS Collaboration, Leptons in Near Earth Orbit, Phys. Lett B. 2000, **484**(102):10-22

[14] Cortina J, Gonzalez J C. Cosmic electron background in low energy imaging atmospheric cherenkov telescopes: effect of the geomagnetic field [J]. *Astropat. Phys.*, 2001, **15**:203-210

[15] Armstrong T W, Chandler K C. Barish J. Calculations of neutron flux spectra produced in the earth's atmosphere by galactic cosmic rays [J]. *J. Geophys. Res.*, 1973, **78**:2715-2726

[16] Ginzburg V L, Kurnosova L V, Razorenov L A. Soviet satellite and rocket investigations of the nuclear component of cosmic rays [J]. *Soviet Phys. UspekhI*, 1964, **7**(2):1

[17] Weidenspointner G. The local neutron flux at low Earth-orbiting altitudes [J]. *Adv. Space Res.*, 1998, **21**(12):1781-1784

[18] Mizuno Tsunefumi, *et al.* Cosmic-ray background flux model based on a Gamma-ray large area space telescope balloon flight engineering model [J]. *Astrophys. J.*, 2004, **614**(1):1113-1123

[19] Peter K F. Cosmic Ray at Earth: Research's Reference Manual and Data Book [M]. Grieder: Grieder Institute of Physics University of Bern Switzerland, 2001