

文章编号: 1001—4322(2000)03—0339—04

空间辐射效应的蒙特-卡罗模拟*

王同权, 沈永平, 张若棋, 王尚武, 张树发

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要: 概述了天然宇宙空间的辐射环境, 简要地分析了辐射效应机制, 在辐射效应的蒙特-卡罗模拟中对靶材料作了无定形假设, 入射粒子在靶材料中的弹性能量损失采用经典二体散射公式, 非弹性能量损失高能时采用 Beth-Bloch 公式, 低能时采用 Lindhard-Scharff 公式, 中能时采用插值公式, 撞出晶格原子引起的次级损伤用 Kinchin-Pease 模型计算, 最后对 100keV 硼离子入射于硅材料引起的辐射效应进行了模拟计算, 并给出了计算结果和分析。

关键词: 辐射环境; 辐射效应; 蒙特卡罗模拟方法

中图分类号: P353.4 O483 **文献标识码:** A

恶劣的空间辐射环境严重地威胁着卫星和空间飞行器的安全, 应用于卫星或空间飞行器的电子学系统在宇宙空间往往经受空间辐射而导致性能减低或失灵, 最终甚至导致卫星或空间飞行器的灾难性的后果^[1], 为了提高卫星和空间飞行器的运行安全性, 必须进行电子学系统抗辐射加固研究, 本文用蒙特-卡罗方法对空间辐射效应进行了模拟计算, 以期通过合理的设计减轻甚至避免辐射的危害。

1 空间辐射效应简介

地球轨道空间辐射粒子包括地磁场俘获辐射带(Van Allen 带)粒子和宇宙射线。地磁场俘获辐射带粒子主要是电子、质子以及少量的重离子, 地磁场俘获辐射带中质子能量可达 50MeV, 电子的最高能量达 7MeV^[2]。宇宙射线有两种来源, 即来自于太阳耀斑爆发的太阳宇宙射线和来自于太阳系以外的银河宇宙射线。银河宇宙射线主要由质子(85%)、氦离子(14%)和高能重离子(1%)组成^[3]。太阳宇宙射线主要是质子(90%~95%)和氦离子, 而高能重离子相对于银河宇宙射线本底可忽略^[4]。太阳宇宙射线通量与太阳耀斑爆发密切相关, 由于太阳耀斑爆发的偶然性, 太阳宇宙射线通量具有多变性和不可预测性。

空间辐射对电子学系统的辐射破坏主要有电离效应和位移损伤。电离效应又包括总剂量电离损伤和单粒子效应。总剂量电离损伤可使半导体电导率发生变化, 漏电流的增加和时间响应的变坏等, 表面器件以总剂量电离损伤为主。单粒子效应 SEE (Single event effect) 是粒子辐射的另一类电离效应。当高能重离子穿过半导体存储器的灵敏体积时, 它在单位距离上产生很高的电离密度, 有可能产生足够的电荷使存储态翻转, 导致存储信息的错误, 这就是所谓的单粒子扰动 SEU (Single event upset), 有时也称之为软错误, 这类错误可以通过程序重写等方法进行改正, 但无疑对计算机系统性能降低或失灵存在潜在威胁。还有另一类称之为硬错误的单粒子效应, 硬错误包括单粒子烧毁 SEB (Single event burnout) 和单粒子锁闭 SEL (Single event latchup) 等, 除非电路电源电流有限, 这类错误的发生将导致半导体器件物理上的永久性破坏。位移损伤是由于入射粒子与晶格原子发生级联式碰撞产生大量的 Frenkel 缺陷, 然后由于点阵形变及热运动, 互相发生作用而退火, 最终达到稳定状态, 形成的稳定缺陷在晶体引入一些深能级俘获陷阱和浅能级俘获陷阱。浅能级俘获陷阱将导致多子(多数载流子)的复合, 使得多子的浓度降低。而深能级俘获陷阱又将导致少子(少数载流子)寿命的减小, 电子-空穴对热产

* 国防科技预研基金项目资助课题, 项目编号: 97J11 G 2 KG0140
1999年12月1日收到原稿, 2000年4月17日收到修改稿。
王同权, 男, 1970年出生, 在职博士生, 讲师

生率的提高和载流子迁移率的退化。

2 蒙特卡罗模拟

高能辐射粒子入射到靶材料之中, 粒子在穿越物质材料时通过与材料中的电子和原子的碰撞逐渐损失能量, 能量损失过程的特征可用单位长度上的能量损失 $(-dE/dx)$ 来描述, $(-dE/dx)$ 又称为阻止本领。入射粒子损失掉的能量的一部分使得材料中原子的内部自由度激发, 一部分导致材料原子的整体运动, 这两部分能量损失分别称为非弹性能量损失和弹性能量损失。高速带电粒子在穿越物质时的能量损失主要是非弹性能量损失。

弹性能量损失 $(-dE/dx)_n$ 又称为核阻止本领, 而非弹性能量损失 $(-dE/dx)_e$ 。通常被称为电子阻止本领。所以总阻止本领为

$$(-dE/dx) = (-dE/dx)_n + (-dE/dx)_e \quad (1)$$

入射粒子同靶原子的单次弹性散射后的能量损失为

$$T(\Theta) = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2}E_0\sin^2\frac{\Theta}{2} \quad (2)$$

其中 M_1, M_2 分别为入射粒子和靶原子质量; E_0 为入射粒子初始动能; Θ 为质心系下的散射角(极角), 它与实验室系下的散射角 ϕ 的关系为 $\tan\phi = M_2\sin\Theta/(M_1+M_2\cos\Theta)$ 。而方位角 φ 为0到 2π 之间随机均匀分布, 因此可以抽样得到 $\varphi = 2\pi t_n$, 其中 t_n 为0到1之间的随机数。在实际的计算中, 离子在材料中的输运以靶材料入射面的法线为参考方向。离子运动与参考方向的夹角为 α , 在第 i 次随机游动之后这个夹角的余弦为 $\cos\alpha_i = \cos\alpha_{i-1}\cos\phi_i + \sin\alpha_{i-1}\sin\phi_i\cos\varphi_i$ 。然而高能入射粒子在材料中的能量损失却主要源于非弹性碰撞, 非弹性部分能量损失分为两部分, 一部分使原子内部激发, 另一部分使原子电离; 当入射离子的速度足够大时这两部分的能量损失相等, 这就是所谓的等分定则。高能粒子在材料中的非弹性碰撞导致电离效应。对于能量损失的非弹性部分在高能时可以利用玻恩近似方法得到所谓的Bethe-Bloch公式

$$(-dE/dx)_e = \frac{4\pi Z_1^2 e^4}{m_e v_0^2} N Z_2 \left[\ln\left(\frac{2m_e v_0^2}{I}\right) + \ln\left(\frac{1}{1-\beta^2}\right) - \beta^2 - \frac{C}{Z_2} \right] \quad (3)$$

其中 Z_1, Z_2 分别为入射粒子和靶原子的原子序数; e 为电子电荷; m_e 为电子质量; N 为靶原子数密度; v_0 为入射粒子的速度; β 为相对论因子; I 称为平均电离势; C 为壳修正参数, 它是由于原子内壳层电子的速度等于甚至大于入射离子的速度引起的, 常由实验来确定。

在低能情况下, 电子阻止截面采用Lindhard-Scharff公式^[5]

$$S_L = N^{-1}(-dE/dx)_e = kE^p \quad (4)$$

其中 E 为粒子能量; $k = \frac{1.212Z_1^{7/6}Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/2}M_1^{1/2}}$; $p = \frac{1}{2}$ 。

在高能和低能之间的能区, 电子阻止截面采用插值方法得到。

蒙特卡罗模拟方法(M-C方法)通过计算机模拟跟踪一大批入射粒子的运动。粒子的位置、能量损失以及次级粒子的各种参数都在整个跟踪过程中存储下来, 最后得到各种所需物理量的期望值和相应的统计误差。在M-C方法计算过程中采用连续慢化假设, 即入射离子与材料靶原子核的碰撞采用两体碰撞描述, 这一部分主要导致入射离子运动轨迹的曲折, 能量损失来自于弹性能量损失部分, 而在两次两体碰撞之间认为入射离子与材料中的电子作用连续均匀地损失能量, 当入射为重离子时可认为在这期间入射离子作直线运动, 能量损失来自于非弹性能量损失部分。两次两体碰撞之间的距离以及碰撞后的参数通过随机抽样得到。对于次级粒子所引起的材料损伤可以利用Kinchin-Pease模型计算^[6], 某次碰撞能量损失为 $T(\Theta)$ (见公式2)的事件导致的Frenkel缺陷对数目为

$$v = \begin{cases} 1, & E_d \leq E_v < 2.5E_d \\ \frac{0.8E_v}{2E_d}, & E_v \geq 2.5E_d \end{cases} \quad (5)$$

其中 $E_d = 15\text{eV}$ 为靶原子的位移阈能, $E_v = T(\theta) / [1 + K_d g(\epsilon)]$ 为碰撞能量损失 $T(\theta)$ 用于产生缺陷的能量, $K_d = 0.1334Z_2^{2/3} M_2^{-1/2}$ 为 $T(\theta)$ 用于电子过程的系数, $\epsilon = 0.01014Z_2^{-7/3} T(\theta)$ 为无量纲化能量, 插值函数 $g(\epsilon) = \epsilon + 0.40244\epsilon^{3/4} + 3.4008\epsilon^{1/6}$.

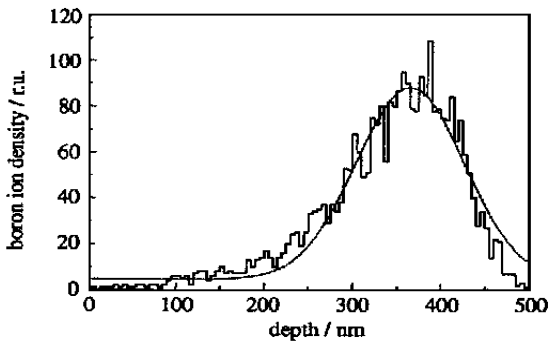


Fig 1 100keV boron depth distributions in silicon
图 1 Si 材料中的入射硼离子的浓度分布

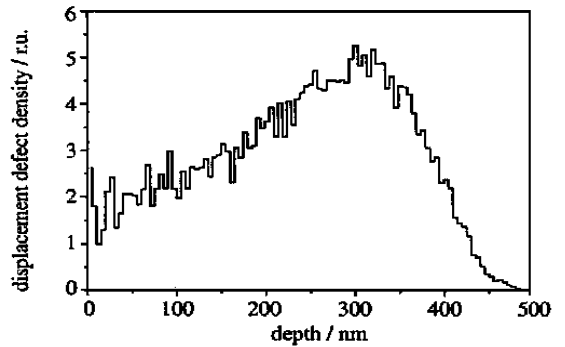


Fig 2 Displacement defect densities for 100keV boron in silicon
图 2 Si 材料中的位移缺陷浓度分布

以上述原理为基础, 编制了 FORTRAN 77 蒙特-卡罗模拟程序 RADDAM, 在微机上进行了模拟计算, 在计算中假设单能 100keV 硼离子垂直入射于无限大平板无定型硅材料中, 通过跟踪 10000 个离子历史, 分别记录弹性能量损失和非弹性能量损失, 其中非弹性能量损失又用于计算引起的靶材料的电离密度(每 3.6eV 的能量产生一个电子-空穴对^[4])。

图 1 为 100keV 的硼离子入射于 Si 材料中的入射硼离子沉积的浓度分布, 其中光滑线为计算结果的高斯拟合曲线, 可以看出, 在这里入射离子沉积的浓度分布可以近似为高斯分布, 所以在离子注入掺杂技术中, 对于 keV 量级能量的入射离子分布常用高斯分布处理是合理的。从图 1 还可以看出, 对于一定能量的入射粒子, 有一个相应的射程, 大部分的入射粒子最后沉积于相应射程深度处。图 2 为 Si 材料中产生的位移缺陷浓度分布的模拟结果, 由图 2 可以看出随着入射硼粒子在材料中的穿透, 产生的位移缺陷先增加后下降, 在入射粒子射程深度附近产生的位移缺陷浓度最大, 这主要是由于位移缺陷的产生源于入射粒子于材料原子之间的弹性散射(即公式(1)中的核阻止本领)。

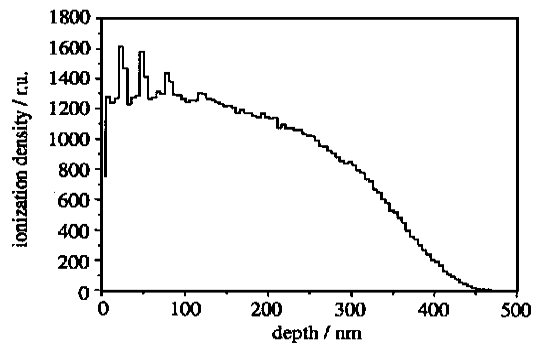


Fig 3 Ionization density distribution for 100keV boron in silicon
图 3 Si 材料中产生的电离密度分布

在低能时弹性散射占主要地位, 随着入射粒子在材料中的穿透深度的增加, 其动能不断减低, 因此弹性散射逐渐占优导致较多位移缺陷的产生。而在高能时非弹性散射(即公式(1)中的电子阻止本领)占主要地位, 入射粒子主要以非弹性散射通过对靶材料的电离和激发损失能量, 所以正如图 3 所示, 源于入射粒子于材料原子之间非弹性散射的电离密度随着入射深度的增加逐渐下降, 由于入射粒子导致的电离密度最大值在靠近靶材料的表面, 因此这也说明了表面器件的电离损伤较严重的原因。

3 结论

空间抗辐射加固研究有必要进行空间实验数据积累和分析处理, 建立适当的简化空间辐射环境模型, 而在具体应用时再根据问题的特殊性进行部分修正, 尽可能准确地对空间辐射环境进行预报, 不至于对航天器的设计提出过高要求。国外目前使用较多的空间辐射环境模型有 AP8(用于质子)和 AE8(用于电子)。我国在这方面的的工作也已有所开展, 有了初步成果。同样, 辐射效应机制的研究涉及一个多学科交叉的问题, 涉及核物理、固体物理、半导体物理以及电子技术等多方面的知识, 而由于辐射效应

机制的复杂性,从物理图象出发建立一整套的理论模型有一定的难度。本文对空间辐射环境进行了初步的分析,辐射效应的蒙特卡罗模拟也仅仅是一个开端,更细致的工作还有待于进一步开展。

参考文献:

- [1] Lauriente M, Vampola A L. Spacecraft anomalies due to the radiation environment[A]. 36th aerospace science meeting & exhibit [C], Jan 12, 1998 Reno, NV, AIAA 98-1048
- [2] Stassinopoulos E G, Raymond J P. The space radiation environment for electronics[J]. *Proc of the IEEE*, 1988, **76**: 1423
- [3] Mayer P, Ramaty R, Webber W R. Cosmic rays—astronomy with energetic particles[J]. *Physics Today*, 1974, **27**: 23
- [4] Adams J H. Jr. Cosmic ray effects on microelectronics[R]. NRL memorandum report 4506, August 25, 1981.
- [5] Lindhard J, Scharff M. Range concepts and heavy ion ranges[J]. *Phys Rev*, 1961, **124**: 128
- [6] Biersack J P, Hagmark L G. A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets[J]. *Nucl Instr and Meth*, 1980, **174**: 257.

MONTE CARLO SIMULATION OF RADIATION EFFECTS IN SPACE

WANG Tong-quan, SHEN Yong-ping, ZHANG Ruo-qi, WANG Shang-wu, ZHANG Shu-fa

Department of Applied Physics, NUDT, Changsha, 410073

ABSTRACT: The general properties of natural space radiation environment are summarized, the basic mechanisms of radiation effects are analyzed briefly. In the Monte Carlo Simulation of the radiation effects, the amorphous target material is assumed, the elastic energy loss of incident particle is calculated by binary collision approximation. The inelastic energy loss of project particle for the high energy is calculated by Bethe-Bloch formulation, Lindhard-Scharff formulation is used for low energy and the interpolation formulation was used for the gap between the high and low energy region. The Kinchin-Pease model is used to calculate the secondary damage caused by the displaced lattice atom. Finally the computed results of 100keV Boron incident on silicon are presented and analyzed.

KEY WORDS: radiation environment; radiation effects; Monte Carlo simulation methods