

移位损伤剂量模型及其应用^{*}

张庆祥 韩建伟 师立勤 张振龙 黄 治

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要 首先描述了移位损伤的机理及其影响器件性能的机制, 引入了适合航天器工程抗辐射加固设计使用的移位损伤剂量模型, 探讨了其在 CCD 器件电荷传输效率 CTE, Si 器件平均暗电流以太阳能电池阵输出功率等工程参数衰降中的应用, 介绍了建立的基于移位损伤剂量模型的空间环境中 CCD 器件 CTE 衰降预测模式, 其结果与欧空局空间环境信息系统的计算结果相吻合. 该程序在光电器件抗辐射加固设计中具有重要的应用价值.

关键词 移位损伤; 非电离能量损失; 光电器件; 电荷传输效率; 暗电流

中图分类号 P 412

An Introduction to Displacement Damage Dose Model and Its Applications

ZHNAG Qingxiang HAN Jianwei SHI Liqin ZHANG Zhenlong HUANG Zhi

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Photonics are increasingly used in space missions to promote performance of space burn system. The radiation issues for photonics are significantly different from those of Si digital microelectronics. It has been found that displacement damage effect is one of the most important damages for photonics used in space radiation environment and a few spacecraft anomalies have been attributed to displacement damage. So displacement damage have been studied seriously in recent year. In this paper, firstly the mechanism for displacement damage is introduced and the ways displacement damage affecting the performances of photonics are discussed; then displacement damage dose model which based on non-ionization energy loss is presented to predict the degradation of CTE in CCD, dark current in Si device and output power in solar cell. Finally, a program based on DDD model for CTE decline prediction in space environment is introduced. The difference between our prediction result with that of ESA SPace ENVironment Information System (SPENVIS) is less than 10%. In addition to that, the program can be used to evaluate the effect of shield for sensitive device and to convert the proton spectrum for a particular mission to a equivalent fluence at a specific proton energy. The study results will find widely applications in satellite radiation-harden design.

Key words Displacement damage, Non-ionization energy loss, Photonic, Charge transfer efficiency, Dark current

^{*} 中国博士后科学基金项目 (2003034203) 和中国科学院王宽诚博士后奖励基金项目 (2003017) 共同资助
2004-10-22 收到原稿, 2005-01-04 收到修定稿

1 引言

电子器件和光电器件容易受到空间辐射环境的影响, 因此在航天器设计中选择器件时必须考虑辐射效应的影响, 以保证其在空间辐射环境中完成预定的功能. 辐射效应通常可以分为单粒子效应, 总剂量效应和移位损伤效应 3 类. 单粒子效应和总剂量效应都是通过电离机制引起的, 移位损伤是由入射粒子和靶材料原子核之间的相互作用引起的, 总剂量效应主要影响器件结构中的氧化层及其界面, 移位损伤影响器件的“体”特性, 二者都是累积效应, 即器件的性能是随着累积剂量的增加而逐渐恶化的^[1].

对材料移位损伤的研究从 19 世纪 40 年代就已经开始, 大多工作是针对核反应堆和加速器等核辐射环境中材料、电子器件和探测器的. 在空间辐射环境中, 移位损伤的考虑局限于太阳能电池阵等, 对于位于卫星内部的元器件, 只考虑总剂量效应. 普遍使用的 MOS 场效应管 (MOSEFT) 对移位损伤不敏感, 也使得移位损伤的影响被低估. 随着元器件抗总剂量能力的提高, 新型光电器件和电子器件在空间环境中应用, 移位损伤成为决定光电器件抗辐射能力的主要因素, 移位损伤引起航天器的故障不断出现, 例如, 美国 TOPEX/Poseidon 卫星的推进器状态电路故障^[2], Chandra 望远镜 CCD 相机因移位损伤导致分辨率的降低等^[3]. 因此移位损伤的研究引起了国际航天机构广泛的重视, 成为近年来空间辐射效应研究的热点.

空间辐射环境是不同能量、多种成分粒子组成的复合环境, 在地面上重现是不可能或者不经济的. 辐射效应研究的一个重要内容就是建立某种等效性原理, 以达到通过地面少量实验, 结合理论模式来预测器件在复杂空间环境中的性能衰降的目的. 对于总剂量效应, 一般认为器件性能的衰降与累积电离剂量成正比, 因此在地面模拟试验中用低成本的 ^{60}Co γ 射线的实验结果来模拟总剂量效应; 对于单粒子效应, 认为线性能量传输 (LET) 值相同的粒子在引起单粒子效应方面的能力是相同的, 因此可以用低能的重离子来模拟空间高能粒子重离子引起的单粒子效应; 而对于移位损伤等效性关系, 目前还正处在研究阶段, 本文给出的移位损伤剂量模型就是一种针对移位损伤的等效性关系.

2 移位损伤机理

如图 1 所示, 荷能粒子与晶格原子相互作用, 如果在碰撞中传递给初冲原子 (PKA) 的动能超过移位能 E_d (产生一个 Frenkle 对所需要的最小能量), 则 PKA 会离开原来的位置, 形成间隙子空位对. 如果 PKA 具有足够的能量, 还会进一步产生移位损伤, 形成级联, 直到传递的能量低于移位能. 如果入射粒子的能量较高, 荷能粒子与晶格原子之间还可能发生核反应, 产生的靶核碎片和其他次级粒子也可能产生 Frenkle 对. 在室温下大部分 Frenkle 对会湮没, 不产生任何永久的损伤. 剩下的小部分空穴和间隙子在晶格中迁移, 经历很多的反应, 形成更复杂的相对稳定的晶格缺陷, 这一过程部分受到半导体材料中杂质的影响. 在 Si 材料中, 高能质子大约只有 0.1% 的能量损失用于产生 PKA, 产生的 90% 的 PKA 都复合了, 而剩下的少数在晶格中迁移, 最终形成稳定的复合缺陷^{[4]~[6]}.

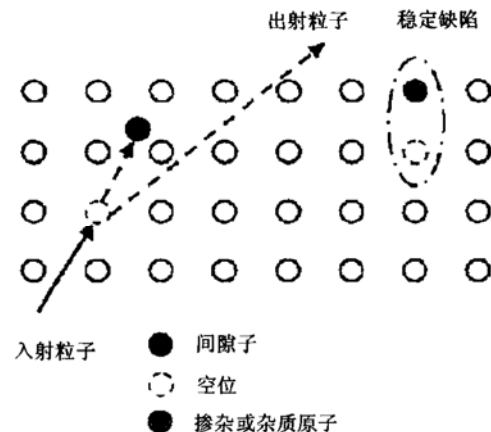


图 1 移位损伤产生缺陷原理示意图

Fig.1 A sketch map of evolution of vacancy-interstitial pairs to stable defects

空间环境中移位损伤主要来自质子、电子以及次级中子. 对于屏蔽层比较薄的太阳能电池阵, 移位损伤主要来自电子和质子的贡献. 而在位于航天器内部的器件, 主要考虑质子的贡献, 次级中子也不能忽视. 有数据表明, 在厚屏蔽航天器的舱内, 次级中子对于移位损伤的贡献可以达到 25%^[7]. 电子主要产生孤立的点缺陷 (8 MeV 以上的电子才能产生缺陷簇), 1 MeV 的中子能够产生大量的级联碰撞, 形成缺陷簇. 而对于质子来说, 随着入射能量的增

大, 其作用机理和缺陷的分布都有很大的区别, 例如 Wood 等用 MARLOWE 程序模拟的结果表明^[8], 在 Si 中, 入射质子能量小于 6—8 MeV, 主要发生库仑相互作用, 反冲核能量低于 2 keV, 只能产生点缺陷; 入射质子能量小于 20 MeV, 主要发生弹性碰撞, 反冲核能量小于 12 keV, 产生单个缺陷簇; 入射质子能量大于 20 MeV, 非弹性碰撞成为主要作用机制, 反冲核能量大于 20 keV, 能够形成树状缺陷结构。

晶格缺陷是对晶体结构完整性的偏离。根据量子力学理论, 在相对于周期场发生偏离处, 将要产生新的能级, 因此晶体缺陷在导带和价带间形成新的能级, 如图 2 所示^[6]。根据能级的位置, 以及器件载流子浓度、温度和缺陷在器件内部所处位置的不同, 这些能级可能通过不同的机制影响器件的光电性能。

第一种是作为一个中间能级, 使价带电子更容易跃迁到导带, 产生额外的电子空穴对, 其中位于器件耗尽区中的中间能级的作用最重要。这些能级使热载流子产生率增加, 导致漏电流的增大。

第二个机制是作为载流子的复合中心, 与载流子产生中心的作用相反, 复合中心俘获位于价带和导带中符号相反的电荷, 使其复合, 因此导致载流子寿命的缩短。

第三是作为载流子陷阱, 如图 2 所示, 比较接近导带的陷阱能级, 可以俘获载流子, 过一段时间后将其释放, 这种机制导致 CCD 器件电荷转移效率的降低。

第四是补偿受主或施主, 产生所谓的载流子去除效应, 使平衡态多数载流子浓度降低, 可以引起器件或电路参数的改变, 例如, 使双极三极管基极电阻增大。

第五是引起缺陷辅助隧穿效应, 对 PN 结二极管的反偏电流产生贡献。

此外缺陷还能作为散射中心, 降低载流子的迁移率, 通过载流子去除效应, 使器件“反型”等。

移位损伤影响 CCD 器件性能的主要途径是耗尽区中热致暗电流的产生以及 N 型掩埋沟道中信号电荷的被俘获。接近禁带中间的能级的缺陷才能有效的产生暗电流, 而位于禁带中心的能级能够将载流子俘获足够长的时间, 从而干扰电荷正常的传输。在 Si 中, 相关的缺陷能级大概位于导带以下 0.4 eV 处, 他们包括 E 中心 (P-V 中心), 替位磷-

间隙子碳 (Ps, Ci) 对、双空位以及高阶的空位复合体。因为能级位置相近, 所以这些缺陷对暗电流产生和电荷俘获的作用相当。

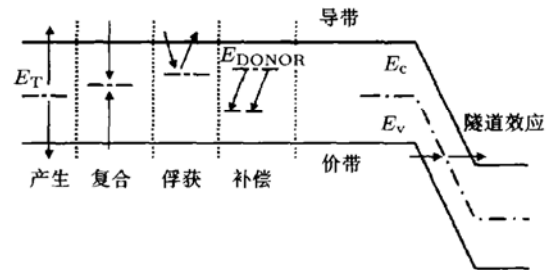


图 2 移位损伤形成的缺陷能级及其对器件性能的影响

Fig.2 A sketch map of electrical effects of radiation-induced defects

3 移位损伤剂量模型及其应用

尽管 50 多年来移位损伤的基础研究取得了一定的进展, 但是以目前的理论水平, 通过理论模拟整个损伤过程 (包括初级缺陷的产生, 退火和移动, 稳定缺陷的形成和排列等) 来预测器件宏观性能的变化还不太现实。而且基于理论的模拟程序要求对物理过程有详细的了解, 也限制其在工程设计中的使用。

在太阳能电池阵列移位损伤的评价中, 通常用 JPL 实验室的相对损伤系数法^[9]。该方法首先通过实验确定不同能量的粒子 (电子或质子) 相对于某个参考能量 (1 MeV 电子或 10 MeV 质子) 的相对损伤系数, 然后将空间的粒子能谱折合成 1 MeV 电子注量, 根据 1 MeV 电子测量的电池性能的变化曲线, 得到空间环境中性能参数的变化。这种方法的缺点非常明显, 因为首先空间环境是不同种类, 不同能量粒子组成的复合环境, 不同类型, 甚至不同工艺的每个参数都要得到其相对损伤系数。耗费大量时间和人力, 成本很高, 不能满足目前航天工程中对于大量不同种类器件移位损伤效应评价的需要。

目前工程实践中处理光电器件移位损伤常用的方法是在非电离能量损失与参数衰减之间建立经验公式。研究结果表明在预测移位损伤引起的参数衰减时, 通常只要考虑损伤过程的第一步, 即入射粒子及其产生的次级粒子在半导体中的非电离能量损失就足够了。非电离能量损失 (NIEL) 是一个与电离能损中线性能量传输类似, 并具有相同单位的量。

与电离剂量类似, 定义 NIEL 和粒子注量的乘积为移位损伤剂量 D_d 。实验结果表明, 移位损伤引起的器件性能的变化与移位损伤碰撞过程中传递的非电离能量损失的量成正比, 这一规律也被称为非电离能量损失定律^{[11],[12]}。利用这一定律, 可以在不同粒子, 不同能量产生的移位损伤之间建立联系, 用少量实验结果就可以预示空间环境中器件性能的衰减。尽管还缺乏真正的微观的理论根据来解释, 但绝大多数不同辐射条件下的实验结果和该定律吻合, 因此非电离能量损失定律已经被广泛接受, 并应用于研究各种半导体材料中的移位损伤。

粒子在半导体材料中的 NIEL 对于研究移位损伤非常重要, NIEL 的计算方法主要有分析法和蒙特卡罗法两种^{[14],[16]}。由于涉及广泛的能区, 没有统一的核相互作用来描述, 因此不同的程序基于不同的相互作用模型以及截面数据, 其结果可能不存在不小的差别, 在特定的能区, 差别能达到 2 倍。对于 Si, GaAs 材料, 目前已经积累了比较多的数据。对 SiGe, GaAs, InP 等半导体化合物, NIEL 的计算很少, 甚至没有。目前 NASA 和欧洲都在开发适合工程设计应用的 NIEL 计算程序, 涉及粒子包括重离子、质子、中子、电子等, 材料包括任何半导体材料, 能区覆盖空间环境的整个能谱。

3.1 CCD 器件电荷传输效率 (CTE)

移位损伤对 CCD 器件的影响主要表现在: 电荷传输效率 (CTE) 降低, 平均暗电流增大, 暗信号不均匀性增强和出现随机信号码 (RTS)。CTE 是 CCD 器件的一个基本的性能参数, 定义为读出过程中信号电荷从一个像素传递到下一个像素的比例。

大量实验结果表明, CTE 衰减与非电离能量损失 NIEL 之间存在正比关系, 所以可以用少量地面实验, 获得比例系数 C , 然后用式 (1) 计算轨道上移位损伤剂量 D_d , 用式 (2) 计算地面模拟实验中所采用的某种粒子的等效注量 (EPF), 用式 (3) 得到卫星寿命期内 CTE 的变化^[11]。其中 $d\Phi(E)/d(E)$ 是航天器屏蔽层后的微分质子通量 (包括俘获带质子和太阳事件质子), NIEL(E) 为不同能量下质子在 Si 材料中的非电离能损, t_m 为航天器的寿命。

$$D_d = \int_0^{\infty} \text{NIEL}(E) \cdot \frac{d\Phi(E)}{dE} \cdot dE. \quad (1)$$

$$\text{EPF} = D_d / \text{NIEL}(E_{\text{test}}). \quad (2)$$

$$\Delta \text{CTE} = t_m \cdot C \cdot D_d. \quad (3)$$

采用不同厚度屏蔽材料的质子微分能谱进行计

算, 就可以对屏蔽的效果进行评价, 为卫星系统的设计提供依据。图 3 给出了用欧空局 SPENVIS 程序计算的神舟飞船轨道 CCD CTE 参数衰减与屏蔽层厚度的关系。

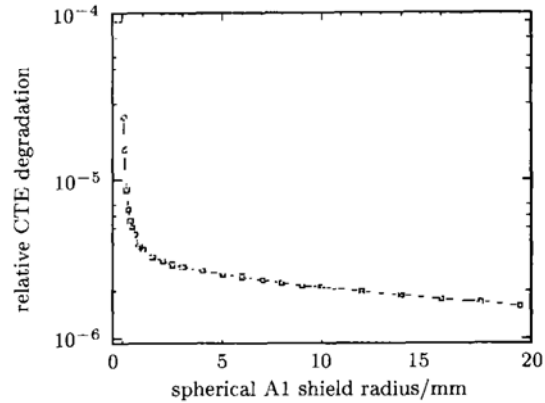


图 3 欧空局 SPENVIS 系统计算神舟飞船轨道 CCD CTE 参数衰减与屏蔽层厚度的关系

(寿命 1 年, 损伤因子 $1 \times 10^{-11} \text{ g (Si)}$)

Fig.3 On-orbit prediction of CTE of different shield thicknesses for SZ spaceship by using SPENVIS

(mission duration: 1 year,

damage factor $1 \times 10^{-11} \text{ g (Si)}$)

3.2 Si 器件暗电流增大

Si 器件中的暗电流主要来自两部分, 移位损伤产生的“体”暗电流和总剂量效应产生的表面暗电流, “体”暗电流是许多 Si 器件暗电流的主要来源。Srouf^[16]等总结了辐射在 Si 器件耗尽区中产生的缺陷, 进而引起平均暗电流增大的实验结果, 发现暗电流密度 (ΔJ_d) 可以通过下式得到:

$$\Delta J_d = qWD_dK_{\text{dark}}. \quad (4)$$

其中, q 为电子电荷, W 为耗尽区宽度, K_{dark} 为暗电流损伤参数。而且对于质子和中子, 在 300 K 温度下, 辐照后退火 7 天, K_{dark} 为 $1.9 \times 10^5 \text{ cm}^3 \cdot \text{s} \cdot (\text{MeV/g})^{-1}$ 。值得指出的是, 1 MeV 的电子 (NIEL 值在 $10^{-4} \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ 以下, K_{dark} 将不再是常数, 而是一个与 NIEL 有关的变量)。因此用式 (1) 得到空间环境中 D_d , 知道器件单元耗尽区的宽度, 不用通过实验就可以计算平均暗电流的增大。

3.3 太阳电池阵验证分析工具 (SAVANT)

NASA Lewis 研究中心开发了基于移位损伤剂

量模型的太阳能电池阵验证分析工具 (SAVANT), 用 SAVANT 可以方便地评估太阳能电池阵在轨寿命末期的性能, 对于不同太阳能电池工艺的地面模拟实验的开发和设计也很有帮助^[16]. 实验数据分析表明, 太阳能电池阵最大功率与移位损伤剂量存在如下关系:

$$P_{\max}/P_0 = 1 - C \cdot \ln\left[1 + \left(D_d/D_x\right)\right]. \quad (5)$$

其中, $P_{\max}$ 是电池的最大输出功率, P_0 是初始功率, C 和 D_x 是与太阳能电池有关的常数, D_d 是总的移位损伤剂量. 利用式 (5), 只要得到 3 个能量点的数据就可以确定未知参数, 例如用一个能量的质子, 不同能量的电子, 或者一个能量的质子, 一个能量的电子以及 ^{60}Co γ 射线数据, 就可以确定空间复杂环境中太阳能电池功率的变化. 图 4 分别给出了美国 PASP Plus 空间飞行试验中 SAVANT 预测的 GaAs 电池最大输出功率衰减和实测值, 二者差别在 1% 以内^[16].

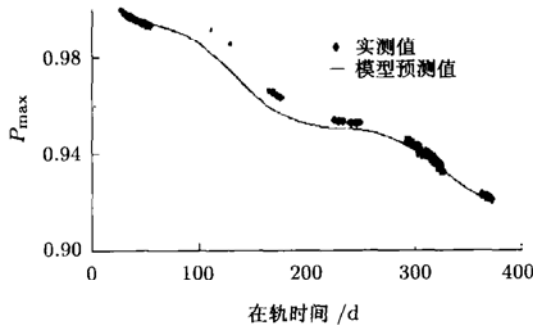


图 4 GaAs/Ge 太阳电池归一化最大功率衰减计算值与 PASP Plus 空间实验实测值之比

Fig.4 Normalized power output versus day of mission for the PASP Plus GaAs/Ge solar cell experiment

4 CCD 器件 CTE 衰降预测程序

我们建立的基于移位损伤剂量模型的 CCD 器件 CTE 衰降预测程序框图如图 5 所示, 该程序的计算结果与图 3 所示的欧空局空间环境信息系统 (SPENVIS) 计算结果的差别为 7.5%. 该程序可以给出卫星寿命期内器件敏感参数的衰降, 据此设计足够的裕度; 评价不同种类、不同厚度材料屏蔽的效果, 进行屏蔽的优化设计; 估计太阳质子事件对敏感器件的影响, 用于故障的诊断; 针对特定轨道的移位损伤环境给出不同粒子的等效注量, 方便选择实验条件.

目前该程序还在完善之中. 主要包括两个方面, 一是辐射传输, 二是非电离能量损失计算方法. 虽然低能质子不能穿透航天器通常采用的屏蔽层, 0.0254 mm 的熔融石英玻璃盖片足以阻挡 2.6 MeV 以下的质子, 但因屏蔽层慢化为低能质子产生的移位损伤仍然很重要. Messenger 等人的研究结果表明^[17], 能量低于 0.1 MeV 的质子对 GaAs 太阳能电池总的移位损伤剂量的贡献超过 30%, 其原因在于 GaAs 材料质子的 NIEL 峰值在 0.4 keV 处. 因此在考虑太阳能电池的移位损伤剂量时, 穿过屏蔽层后的微分质子能谱的下限为 100 eV, 但是我们目前的传输计算工具, 包括常用的 Space radiation 软件, 主要考虑总剂量效应, 传输粒子能谱下限为 0.1 MeV, 因此需要扩展辐射传输程序的能量下限. 此外传输程序还要能够给出各种成分次级粒子的能谱. 目前已经收集了国外质子、中子、电子在 Si, GaAs 等常用材料中的非电离能量损失, 但是要考虑空间环境中更多的粒子和其他的半导体材料, 还必须建立自己的非电离能量损失的模式.

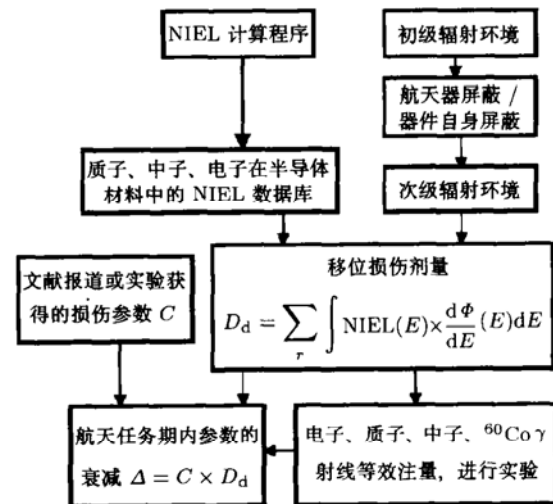


图 5 基于移位损伤剂量模型的 CCD 器件 CTE 衰降预测程序框图

Fig.5 Displacement damage dose based on-orbit CTE degradation prediction process block diagram

5 结论

原子移位损伤的研究在近年来得到广泛的重视, 随着新型光电器件在航天任务中的大量应用, 移位损伤也越来越重要. 欧洲和美国都在开发基于

移位损伤剂量模型这种模型工程模式, 用少量实验结果就可以预示器件性能的衰降, 确定地面模拟实验的方案, 评价不同材料、不同厚度的屏蔽的防护效应。目前我们已经建立了初步的基于移位损伤剂量模型的移位损伤预测模式, 为进一步开展移位损伤的实验研究和新型航天器上采用先进的光电器件奠定了基础。

虽然非电离能量损失剂量定律是一种非常有用的工程工具, 但是与电离损失剂量概念一样, 在应用中也存在局限性。研究发现存在偏离该定律的情况, 例如在接近移位能阈值的低能段, 移位损伤剂量定律与实验值存在明显的偏差^[19]。在 GaAs(以及其他的 III-V 族化合物) 器件中, NIEL 与能量的关系与实验得到的损伤系数与能量的关系存在较大差别^[20], 因此在应用移位损伤剂量模式时应该注意其局限性。

参考文献

- [1] Edmonds L D *et al.* An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics. JPL Publication, 2000, 00-06
- [2] Barnes C *et al.* Recent photonics activities under the NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) program. Proceedings of SPIE Volume 4823 photonics for space environments VIII, 2002
- [3] Nartallo R. ESA Radiation Environment Induced Degradation on Chandra and Implication for XMM. ESA/estec/tos-em/00-015/RN, 2000
- [4] Srour J R. review of displacement damage effects in silicon devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2003, **50**(3):653—670
- [5] ESA-GSP Work Package 1 Study Report Predicting Displacement Damage Effects in Electronic Components by Method of Simulation. 2002, 15157/01/NL/PA
- [6] Hopkinson G P. Proton effects in charge-coupled device. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(2):614—627
- [7] Insoo Jun *et al.* Displacement damage in silicon due to secondary neutrons, pions, deuterons, and alphas from proton interaction with materials. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2001, **48**(6):2034—2037
- [8] Woods S *et al.* Simulation of radiation damage in silicon. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1981, **28**(6):4107—4112
- [9] Tada H Y *et al.* The Solar Cell Radiation Handbook. JPL Publication 82-69, 1982
- [10] Anspaugh B E. GaAs Solar Cell Radiation Handbook. JPL Publication 96-9, 1996
- [11] Marshall C J *et al.* Proton Effects and Test Issues for Satellite Designers: Part B: Displacement Damage Effects. NSREC Short Course 1999
- [12] Dale C J *et al.* Displacement damage effects in mixed particle environments for shielded spacecraft CCDs. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1628—1637
- [13] Summers G P *et al.* Damage correlations in semiconductor exposed to gamma, electron and proton irradiations. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1372—1379
- [14] Daly C J *et al.* A comparison of monte carlo and analytic treatments of displacement damage in Si microvolume. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **41**(6):1974—1983
- [15] Akkermann A *et al.* Updated NIEL calculation for estimating the damage induced by particles and gamma-rays in Si and GaAs. *Rad. Phys. Chem.*, 2001, **62**(4):301—310
- [16] Srour J R *et al.* Universal damage factor for radiation-induced dark current in silicon devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, **47**(6):2451—2458
- [17] Walters R J *et al.* Analysis and modeling of the radiation response of multijunction space solar cells. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2000, **40**(6):1092—1097
- [18] Messenger S R *et al.* Protom displacement damage and ionizing dose for sheilded devices in space. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1997, **44**(6):2169—2173
- [19] Messenger S R *et al.* Application of displacement damage dose analysis to low-energy protons on silicon device. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2002, **49**(6):2690—2694
- [20] Messenger S R *et al.* NIEL and damage correlations for high-energy protons in gallium arsenide devices. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2001, **48**(6):2121—2126