

空间辐射环境中的辐射效应*

王同权 沈永平 王尚武 张树发

(国防科技大学应用物理系 长沙 410073)

摘要 天然空间辐射环境与辐射效应基本机制是空间飞行器抗辐射加固研究中的两个关键问题, 本文总结了天然空间辐射环境的总体性质, 并对辐射效应基本机制进行了简要的分析, 指出了目前空间飞行器抗辐射加固研究的重点。

关键词 辐射环境, 抗辐射加固, 辐射效应

分类号 P353.4

Radiation Effects in the Space Radiation Environment

Wang Tongquan Shen Yongping Wang shangwu Zhang Shufa

(Department of Applied Physics, NU DT, Changsha, 410073)

Abstract The natural space radiation environment and the basic mechanisms of radiation effects are two most important issues relating to the research of radiation hardening technology of spacecrafts. In this paper, some of the general properties of natural space radiation environment are summarized, the basic mechanisms of radiation effects are analyzed briefly, and the emphasis of present research relating to the radiation hardening technology of spacecrafts is pointed out.

Key words radiation environment, radiation hardened, radiation effects

应用于卫星或空间飞行器的电子学系统, 在天然空间辐射环境中往往因经受空间辐射而导致性能减低或失灵, 甚至最终导致卫星或空间飞行器的灾难性的后果^[1]。美国 1971 至 1986 年发射的卫星中共发生了 1589 次异常现象, 其中与空间粒子辐射有关的占 70%, 由空间辐射对电子学系统的辐射破坏造成的占 38.1%。

空间辐射对电子学系统的辐射破坏主要有三种方式: 1) 总剂量电离损伤; 2) 单粒子效应; 3) 位移损伤。质子产生总剂量电离损伤, 单粒子效应和位移损伤, 电子主要产生总剂量电离损伤, 而高能重离子主要产生单粒子效应。

1 天然空间辐射环境

地球轨道天然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(包括太阳宇宙射线和银河宇宙射线)。

1.1 地磁场俘获辐射带粒子

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。地磁场俘获辐射带通常又分为内辐射带(1.5 R_e 至 2.8 R_e , $R_e=6380\text{km}$ 为地球半径)和外辐射带(2.8 R_e 至 12 R_e), 内辐射带以质子为主, 而外辐射带以电子为主。

地磁场俘获辐射带中质子能量可达 500MeV。能量大于 10MeV 的质子主要分布在 3.8 R_e 以下, 能量大于 30MeV 的质子主要分布在 1.5 R_e 以下^[2], 而典型的卫星壳体屏蔽能量小于 10MeV 的质子。因此对于低轨道卫星来说, 质子对内部电子学元器件的辐射破坏尤为严重。在外辐射带中电子具有较高的能量和较大的通量(约为内辐射带的 10 倍), 在外辐射带中电子的最高能量达 7MeV, 而在内辐射带中电子的最高能量为 5MeV, 能量大于 1MeV 的电子的通量峰值在 3 R_e 至 4 R_e 之间。

* 国家部委基金项目资助
1998 年 10 月 28 日收稿
第一作者: 王同权, 男, 1970 年生, 博士生

1.2 宇宙射线

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。

太阳系以外的银河宇宙射线通常认为是稳定的,而地球轨道上的银河宇宙射线的通量受太阳活动的调制,在太阳活动频繁期,地球轨道上的银河宇宙射线通量相对减少,而在太阳活动不频繁期,银河宇宙射线通量相对稳定。

银河宇宙射线主要有质子(85%)、氦离子(14%)和高能重离子(1%)组成^[3]。离子通量随原子质量数分布见图1。可以看出,高能重离子(如Fe)的通量与质子通量相比差几个数量级,但是这并不是说高能重离子的辐射效应可以忽视。由于高能重离子在穿入材料时在单位距离上产生很高的电离密度,尤其在考虑半导体器件的单粒子效应时,高能重离子产生的效应不容忽视。图2为银河宇宙射线中各种离子的能谱图^[4]。由图2可见,各种离子的能谱峰对应的离子能量为100~1000MeV/Nu。碳离子的能谱峰对应的粒子能量为2.4GeV,质子和氦离子的最高能量可达10GeV/Nu。对于如此高能粒子,卫星壳体已经无法阻止它们进入舱体内。

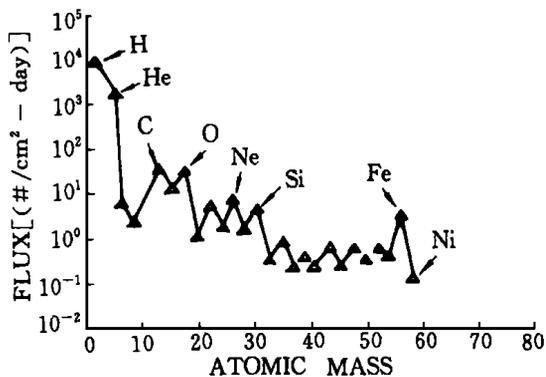


图1 离子通量随原子质量数分布

Fig. 1. Ion numbers distribution versus atomic mass

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可忽略。太阳宇宙射线通量与太阳耀斑爆发密切相关,在太阳耀斑爆发后的几十分钟内太阳宇宙射线到达地球,而其最大通量将在2小时至1天内到达,并在一星期内逐渐消失,除了一部分的粒子为地磁场所俘获,成为地磁场俘获辐射带粒子。在一次比较大的太阳耀斑爆发后,地球轨道上的质子和氦离子通量可增加四个数量级之多,而高能重离子相对于银河宇宙射线可增加50%。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。

2 航天器内辐射环境

航天器内部辐射环境不仅与所处轨道的空间辐射环境有关,同时也与航天器壳体材料与厚度相关。航天器壳体不仅能阻止部分粒子进入舱内,同时对进入舱体内的粒子也起到能量衰减改变粒子能谱分布,并且有可能导致次级粒子的产生(如电子在壳体材料中受阻产生韧致辐射X射线等)。

辐射粒子在穿越不同厚度的铝壳后的通量分布如图3(a)和图3(b)^[5],横坐标为粒子的质量阻止本领LET(或称线性能量转移),纵坐标为粒子通量。其中图3(a)为太阳耀斑爆发时宇宙射线粒子通量随LET和铝壳不同厚度的变化曲线,从中可以看出随着铝壳厚度的增加能量较低的粒子衰减较大(LET较大对应于粒子较低的能量),而较高能量的粒子的衰减很小。图3(b)为没有太阳活动影响时的宇宙射线(可以认为是银河宇宙射线)粒子通量随LET和铝壳不同厚度的变化曲线,可见铝壳厚度的增加对银河宇宙射线的通量分布影响甚微。而典型的卫星壳体铝层厚度约为几个毫米,可见靠增加卫星壳体铝层

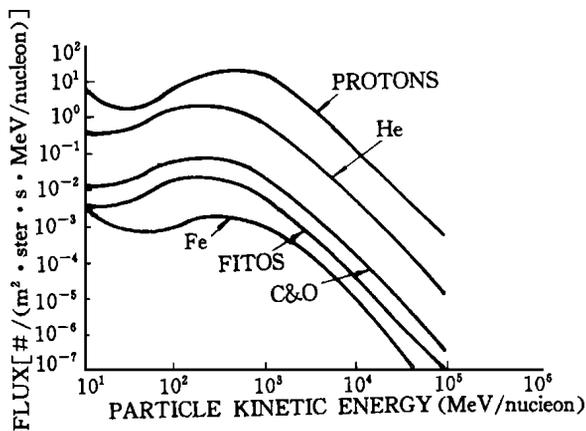


图2 银河宇宙射线中各种离子的能谱图

Fig. 2. Energy spectrum of Galaxy cosmic ray

厚度来减少宇宙射线对卫星内部的辐射是不可行的,探索对卫星壳体加适当涂层以减少宇宙射线对卫星内部的辐射具有重要的意义。

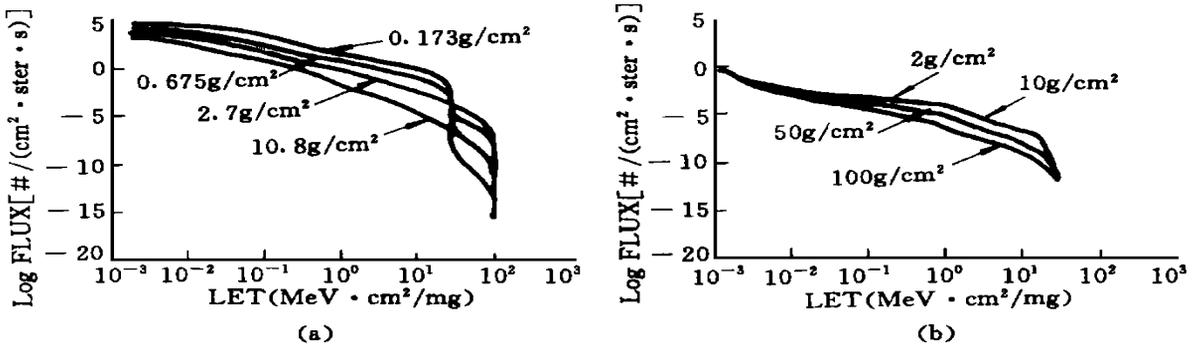


图3 粒子在穿越不同厚度的铝壳后的通量分布
Fig.3 Partide flux distribution by the shield of Aluminium shell

图4为 Explorer-55 上 139 天内质子,电子和韧致辐射对总剂量的贡献随铝壳体厚度变化曲线⁶⁾。从图中可见,韧致辐射对总剂量的贡献可以忽略,当铝壳体厚度超过 150M il(1M il= 千分之一英寸,1英寸= 2.54 厘米)时,电子对总剂量的贡献也可忽略,而铝壳体厚度从 150M il 增加至 250M il 时,质子对总剂量的贡献才减少约一半。虽然 Explorer-55 处于特定的地球轨道,但是图4所表现出来的趋势对于不同的地球轨道是一致的。

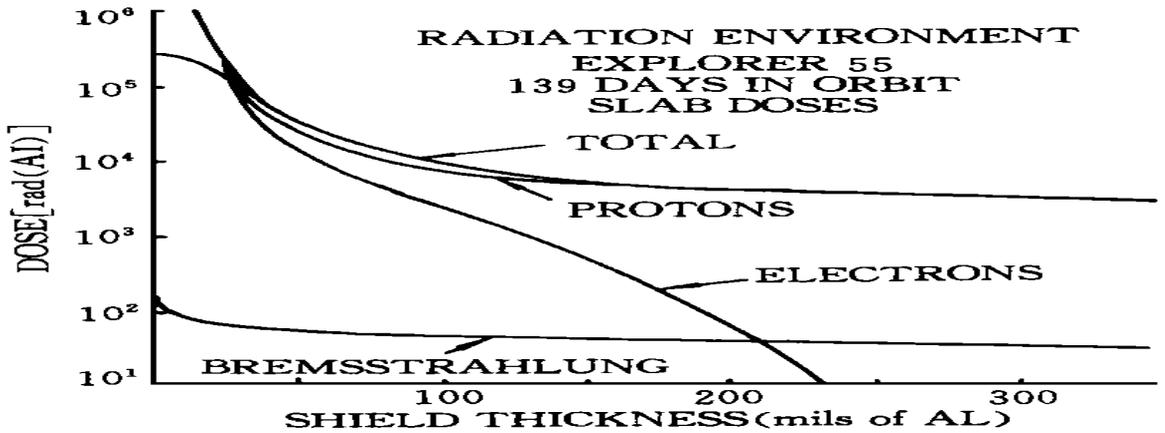


图4 Explorer-55 质子、电子和韧致辐射对总剂量的贡献随铝壳体厚度变化曲线
Fig.4 Total dose by the contribution of several particles in the Explores-55 satellite

对于不同的地球轨道,航天器内部的辐射剂量率在 10^{-6} 至 10^{-3} Rad(Si)/s 之间,对于近地高倾角地球轨道,200M il 厚铝壳体内年剂量少于 1kRad(Si)。而在辐射环境最为恶劣的地球轨道(约为地球同步轨道的高度一半处),航天器内部的年辐射剂量约达 1M Rad(Si)。

3 半导体器件的带电粒子辐射效应

3.1 电离效应

当带电粒子入射到半导体器件内时,带电粒子可以通过电离过程使得一些束缚电子被从价带激发到导带,产生大量的电子-空穴对,形成致密电离迹径。在 Si 中产生一个电子-空穴对所需最低能量分别为 3.6eV,在 SiO₂ 产生一个电子-空穴对所需最低能量分别为 17eV,每 Rad 的能量沉积在 Si 中产生的电子-空穴对密度约为 $4 \times 10^{13}/\text{cm}^3$,而在 SiO₂ 中产生的电子-空穴对密度约为 $8.1 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ 。这些带电粒子辐射产生的电子-空穴对将对半导体器件的性能产生影响,严重时甚至可使半导体器件

失灵或烧毁。

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。而目前受到国际上普遍关注的单粒子效应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, 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和单粒子锁闭等, 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。

3.2 位移效应

入射粒子与物质原子核发生碰撞, 将一部分能量交给晶格原子, 当这部分能量超过位移域能时, 将导致晶格原子离开正常的晶格位置成为间隙原子, 而在原来晶格位置留下一个空位, 形成所谓的 Frenkel 缺陷。而入射粒子与晶格原子发生碰撞产生的高能初始反冲原子 PKA (Primary Knock-on Atom) 在晶体内运动, 又可通过级联式碰撞产生更多的 Frenkel 缺陷, 这样产生 Frenkel 缺陷是很不稳定的, 会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(在室温下 90% 的缺陷会在一分钟内复合)。而形成的稳定的缺陷会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—空穴对热产生率的提高和载流子迁移率的退化。一般来说, 位移损伤对少子器件和光电器件的危害较大, 而对于 MOS 器件影响相对较小。

4 航天器电子学系统的抗辐射加固

在恶劣的空间辐射环境下, 为了保证航天器的安全和确保飞行任务的实现, 必须对航天器电子学系统进行抗辐射加固。而对电子学系统进行抗辐射加固又必须从以下两个方面入手: 1) 空间辐射环境模型的建立, 2) 辐射效应机制的研究。

由于空间辐射环境的复杂性, 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, 尽可能准确的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), 由于这些模型制作于 70 年代, 已经不能适应目前应用, 目前新的模型的建立处于国际协作努力之中^[7]。

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像出发建立一整套的理论模型目前还没有。从实验手段出发, 以应急使用为目的。这一方面的工作国外已有较多开展, 而国内的工作相对较滞后, 因此我们的研究在跟踪国外的基础上, 加强理论模拟和地面实验模拟研究, 在摸清辐射效应机制的基础上探索抗辐射加固的途径, 同时对商用元器件的抗辐射容限等进行测试, 以利于商用元器件在航天器上的选用, 降低空间飞行任务成本。

参考文献

- 1 Lauriente M Vampola A L. Spacecraft Anomalies Due To The Radiation Environment. 36th Aerospace Science Meeting & Exhibit, 1998
- 2 Stassinopoulos E G, Raymond J P, the Space Radiation Environment for Electronics. Proc. of the IEEE, 1998
- 3 Mayer P, Ramaty R, Webber W R. Cosmic Rays—Astronomy with Energetic particles. Physics Today, 1974
- 4 Adams J H. Cosmic Ray Effects on Microelectronics. NRL Memorandum Report 4506, 1981
- 5 Adams J H, Jr. The Natural radiation Environment inside a Spacecraft. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1982
- 6 Cliff R A. Prediction and Measurement of Radiation Damage to CMOS Devices on Board Spacecraft. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1976
- 7 Tateo. Space Environment and Effects from ETS-VI Satellite. ESA Symposium on Environment Modelling for Space-based Applications, ESTEC, Noordwijk, NL, 1996