



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

嵌入式系统中的辐射效应

Radiation Effects on Embedded Systems

[法] 拉乌尔·委拉兹克 (Raoul Velazco)

[法] 帕斯卡·弗埃雷特 (Pascal Fouillat) 等著

[巴西] 里卡多·赖斯 (Ricardo Reis)

黄云 张战刚 雷志锋 等译



Raoul Velazco
Pascal Fouillat
Ricardo Reis
Editors

**Radiation Effects
on Embedded
Systems**

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

嵌入式系统中的 辐射效应

Radiation Effects on Embedded Systems

[法] 拉乌尔·委拉兹克 (Raoul Velazco)

[法] 帕斯卡·弗埃雷特 (Pascal Fouillat)

等著

[巴西] 里卡多·赖斯 (Ricardo Reis)

黄云 张战刚 雷志锋 师谦 何玉娟 刘远 岳龙 译



机械工业出版社

Translation from the English language edition:
Radiation Effects on Embedded Systems
edited by Raoul Velazco, Pascal Fouillat and Ricardo Reis
Copyright © 2007 Springer
Springer is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可的出口，视为违反著作权法，将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-8401 号。

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式系统中的辐射效应/（法）拉乌尔·委拉兹克（Raoul Velazco）等著；黄云等译．—北京：机械工业出版社，2017.9

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Radiation Effects on Embedded Systems

ISBN 978-7-111-58286-1

I. ①嵌… II. ①拉…②黄… III. ①微型计算机—系统设计
IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 253787 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：张利萍

责任校对：樊钟英 封面设计：马精明

责任印制：张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15.5 印张·288 千字

0001—2600 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58286-1

定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
电话服务 网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

译者序

2015年5月8日,国务院正式印发的《中国制造2025》明确了航空/航天装备国产化和自主可控的发展方向。随着我国航空航天事业的飞速发展,载人航天、月球探测、北斗导航、深空探测等航天工程对抗辐射电子学提出了迫切需求,大型飞机、宽体客机、干支线飞机、直升机、无人机、通用飞机等军民机研制和产业化发展使国内越来越关注大气中子辐射效应及其检测方法。近些年,在国家大力支持和行业迫切需求的背景下,国内航天抗辐射行业迅速发展,基础科研、产品、应用、试验等相关人员队伍迅速壮大,但国内辐射效应及其试验方法等相关书籍很少,难以满足科技人员的需要。此外,随着微电子器件的特征尺寸不断减小,集成度不断提高,电子器件及系统中的单粒子效应越来越严重,成为威胁航天、航空电子系统安全可靠运行的重要隐患。

本书由法国TIMA实验室的Raoul Velazco、法国波尔多第一大学的Pascal Fouillat和巴西南里奥格兰德联邦大学的Ricardo Reis共同编著,从环境、效应、测试、评价、加固和预计等方面全面详细介绍了嵌入式系统中的辐射效应,主要内容包括空间辐射环境、微电子器件中的辐射效应、电子器件的在轨飞行异常、多层次故障效应评估、基于脉冲激光的单粒子效应测试和分析技术、电路的加固方法及自动化工具、辐射效应试验测试设备以及数字架构的错误率预计方法等。

本书内容全面、丰富且针对性强,覆盖了电子器件及系统辐射效应的方方面面。区别于其他电子系统辐射效应论著,本书从工程化的角度论述空间辐射效应评估、地面模拟、软错误率预计等技术以及国际上目前先进的研究方法论,同时兼具基础性和理论性。本书适合专业从事电子器件及系统辐射效应研究的科研人员和工程化应用的技术人员阅读和借鉴;同时,也可为该领域的“新人”(如研究生)提供必备的基础知识。

本书的翻译和校对工作主要由工业和信息化部电子第五研究所电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室的辐射效应研究团队完成。其中,第1章和第4章由岳龙翻译,第2章和第5章由刘远翻译,第3章和第11章由张战刚翻译,第6章和第12章由雷志锋翻译,第7章和第8章由师谦翻译,第9章和第10章由何玉娟翻译,最后由黄云负责统稿和审校。

机械工业出版社为本书的出版发行提供了大力支持,在此表示衷心感谢!

由于译者水平有限,译本中难免有不妥之处,敬请读者不吝指正。

黄云

于工业和信息化部电子第五研究所
电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室

原 书 前 言

从1962年高海拔核测试导致的Telestar卫星失效开始,自然或人造辐射可能干扰电子设备的操作这一事实已被人们所知晓。今天,航天器高度依赖于电子学。因此,空间辐射效应必须在设计阶段就予以考虑,以保证这些项目的高可靠性和安全性要求。即使宇航级器件存在,在设计和/或制造层面采用所谓的辐射效应“加固”,它们相比于同等货架产品(Commercial Off The Shelf, COTS)的高成本和低性能导致其用于空间的元器件量产(不是专门设计用于空间)是强制性的。这给未来任务的可行性和成功带来一个巨大挑战:一方面,必须尽可能地理解空间环境的本质和变化性;另一方面,必须评价空间环境对电子器件的影响,考虑持续演化的技术和多种多样的器件种类。

此外,随着制造技术的持续发展,纳米电子器件的特点(晶体管的尺寸、操作频率)导致其潜在地对地球大气,甚至地面上的粒子敏感。各种各样应用中的大量集成电路产生一个不可忽略的概率:晶体管出现错误,统称为“SEE”(Single Event Effects,单粒子效应),源于大气中子与硅中原子核反应产生的二次粒子电离。这使得高可靠性/安全性的应用必须强制地在应用设计的前期考虑这些问题,引入需要的硬件/软件错误耐受性机制。

估计一个器件或架构对辐射的敏感性是深入了解辐射对可靠性/安全性层次影响的强制步骤。这样一个步骤要求辐射地面测试,即所谓的加速测试,通过辐射装置,如粒子加速器或激光设备,和对应用环境建模的软件工具来执行。这样的估计,尤其对于导致存储器单元内容扰动的单粒子翻转(SEU),也可能要求实现故障注入;在故障注入中,辐射效应的影响在对目标器件合适描述可用的层次被考虑。基于不使用束流的故障注入方法获得结果的实现和利用构成了一个宝贵的信息源,涉及应用的SEE敏感性估计和一个设计或架构潜在的、应被加固的弱点识别。

本书致力于为读者提供重要的指南,用于处理当今空间以及高海拔大气或地面应用中应当包括的元器件辐射效应。本书包括一系列章节,基于2005年11月20-25日在巴西玛瑙斯市举办的“用于空间的嵌入式系统辐射效应国际学校”的内容。本书共分十二章,前三章分别涉及空间辐射环境的分析和建模、电子器件辐射效应的基础机理、累积或瞬态辐射效应导致的一系列已知的电子器件飞行异常案例描述。

接着的三章致力于多级错误效应的评价、辐射对模拟和混合信号电路的影响[转变为单粒子瞬态(SET)和单粒子翻转(SEU)]、用于SEU模拟的脉冲激光技术基理。

后续的三章涉及辐射效应的减缓技术:用于CMOS技术、保护电路不受辐射

效应影响的设计加固 (HBD) 方法学, FPGA 中的辐射效应和相关的缓和技術, 设计加固自动工具的研究和进展。

最后三章致力于 SEE 和剂量测试的装置描述、数字架构错误率预计的测试方法学和工具以及一个脉冲激光系统用于研究辐射导致的集成电路单粒子瞬态的可能性。列出了三个案例研究, 用于说明这种技术空间和时间分辨率的优点。

Raoul Velazco, Pascal Fouillat, Ricardo Reis

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 空间辐射环境	1
1.1 空间辐射效应	1
1.1.1 空间辐射环境: 范艾伦带、太阳耀斑、太阳风和宇宙射线	1
1.1.2 剂量效应: 产生原因、对电子器件的影响、辐射强度	4
1.1.3 位移效应: 产生原因、对电子器件的效应、辐射强度	5
1.1.4 重离子效应: 产生原因、对电子器件的效应、辐射强度	5
1.1.5 质子效应: 产生原因 (直接或间接)、对电子器件的效应、辐射强度	6
1.2 其他效应	7
1.2.1 原子氧: 来源和效应	7
1.2.2 太阳紫外线: 来源和效应	7
1.2.3 微流星体: 来源和效应	8
1.2.4 轨道碎片: 来源和效应	8
参考文献	9
第 2 章 微电子器件的辐射效应	10
2.1 引言	10
2.1.1 长期效应	10
2.1.2 瞬态效应	11
2.2 MOS 器件	12
2.2.1 阈值电压漂移	12
2.2.2 退化效应	14
2.2.3 亚阈斜率	15
2.2.4 MOSFET 的泄漏电流	15
2.3 双极型器件	17
2.3.1 简介	17
2.3.2 电流成分	17
2.3.3 射-基区耗尽区的复合效应	18
2.3.4 中立基区的复合效应	18
2.3.5 电流增益	19
2.4 单粒子效应	20
2.4.1 引言	20
2.4.2 仿真方法	21
2.4.3 器件级效应	22

2.5 概述	23
致谢	23
参考文献	23
第3章 电子器件的飞行异常	26
3.1 引言	26
3.2 辐射效应综述	27
3.2.1 空间环境	27
3.2.2 元器件中的主要效应类型	27
3.3 飞行异常和空间环境	29
3.3.1 数据来源	29
3.3.2 统计对比	30
3.3.3 空间天气事件效应的一个重要例子	32
3.4 累积效应	34
3.4.1 人工辐射带	35
3.4.2 HIPPARCOS	36
3.4.3 木星上的伽利略探测器	36
3.4.4 超敏感系统	41
3.5 单粒子效应	42
3.5.1 银河宇宙射线	42
3.5.2 太阳粒子(质子,离子)	45
3.5.3 俘获带质子	47
3.6 传感器的特有事件	50
3.6.1 瞬态信号	50
3.6.2 永久或半永久损伤	55
3.7 专用仪器和试验	57
3.7.1 空间环境监视器	57
3.7.2 技术试验	58
参考文献	59
第4章 多层级故障效应评估	61
4.1 前言	61
4.2 FARM 模型	63
4.2.1 故障注入的要求	64
4.2.2 侵扰性	64
4.2.3 速度	64
4.2.4 单次故障注入试验的加速	65
4.2.5 故障清单的产生	65
4.2.6 成本	65
4.3 假设	65
4.4 晶体管级的故障注入	67
4.4.1 产生软错误的粒子	67

4.4.2 硅器件中单粒子瞬态的模拟仿真	67
4.4.3 物理级的 2D/3D 器件仿真	68
4.4.4 电学级的瞬态故障注入仿真	69
4.5 门电路级和寄存器传输级的故障注入	71
4.5.1 无故障运行	72
4.5.2 静态故障分析	72
4.5.3 动态故障分析	73
4.6 系统级故障注入	74
4.6.1 故障模型	74
4.6.2 故障检测支持	75
4.6.3 故障注入执行加速	75
4.7 结论	76
参考文献	76
第 5 章 模拟和混合信号电路的辐射效应	79
5.1 简介	79
5.2 模拟测试	81
5.3 案例一: SRAM 型 FPAA	84
5.3.1 SRAM 型 FPAA 的 SEU 效应	85
5.3.2 故障注入试验	86
5.3.3 试验结果	88
5.4 案例二: $\Sigma - \Delta$ A-D 转换器	90
5.4.1 $\Sigma - \Delta$ A-D 调制器	91
5.4.2 $\Sigma - \Delta$ A-D 转换器的 MATLAB 模型	91
5.4.3 $\Sigma - \Delta$ 转换器的辐射效应	96
5.5 用于缓解 SEU 与 SET 效应的模拟自检验设计	99
5.6 总结	103
参考文献	104
第 6 章 单粒子翻转的脉冲激光测试技术基础	106
6.1 简介	106
6.2 激光测试技术的基本原理	107
6.2.1 激光测试技术分类	107
6.2.2 激光激发率模型	108
6.2.3 激光激发率与重离子的比较	109
6.3 用于 IC 测试的脉冲激光系统	111
6.3.1 激光试验的基本原理	111
6.3.2 试验装置	111
6.3.3 自动化	113
6.3.4 其他系统	113
6.4 激光系统应用	114
6.4.1 脉冲激光 SEU 截面	114

6.4.2 商用 SRAM 的激光试验	116
6.4.3 基于双光子吸收产生载流子的激光单粒子效应	120
6.5 结论	122
参考文献	122
第 7 章 ASIC 电路的设计加固方法	125
7.1 简介	125
7.2 总剂量效应的加固	126
7.2.1 抗辐射版图技术应用的困难	128
7.2.2 最新 CMOS 工艺的趋势	131
7.3 针对单粒子效应的加固	132
7.3.1 单粒子效应的加固	132
7.3.2 针对单粒子锁定 (SEL) 的加固	136
7.4 结论	137
参考文献	137
第 8 章 可编程电路的错误容差	140
8.1 简介	140
8.2 基于 SRAM 型 FPGA 的辐射效应	142
8.2.1 故障注入机理	145
8.3 基于 SRAM 型 FPGA 架构减轻 SET 和 SEU 效应的技术	146
8.4 采用 TMR 方法的 SRAM 型 FPGA 的高层次 SEU 减轻技术	149
8.4.1 提高 TMR 可靠性的解决方案	150
8.4.2 基于布局布线的解决方案	151
8.4.3 基于表决电路调整的解决方案	151
8.4.4 减少开销 TMR 解决方案	152
参考文献	155
第 9 章 用于加固设计的自动化工具	158
9.1 简介	158
9.2 用于 RTL 级别的自动化加固设计	159
9.3 硬件冗余的自动化插入	162
9.3.1 目标选择和重复	162
9.3.2 分辨函数	163
9.3.3 案例	163
9.4 信息冗余的自动插入	168
9.4.1 案例	169
9.5 误差恢复行为	175
9.6 总结	176
参考文献	176
第 10 章 SEE 和总剂量试验测试设备	177
10.1 简介	177

10.2 器件的辐射效应	177
10.2.1 关键参数	178
10.2.2 所需各种参数的简要提示	179
10.2.3 TID	180
10.2.4 SEE	180
10.2.5 DDD	182
10.3 标准和规范	182
10.3.1 TID	182
10.3.2 SEE	183
10.3.3 DDD	184
10.4 试验设备和应用领域	185
10.4.1 TID	185
10.4.2 SEE	187
10.4.3 直流加速器	187
10.4.4 线性加速器	189
10.4.5 环形加速器	189
10.4.6 欧洲用于器件试验的多种设备	191
10.4.7 准单能射线发生器	195
10.4.8 高束流试验线	196
10.4.9 剂量计	197
10.4.10 补偿工具(激光器、 Cf^{252} 、 Am^{241} 、 μ 射线)	199
10.4.11 微束	200
致谢	201
参考文献	201
第11章 数字架构的错误率预计:测试方法学和工具	204
11.1 引言	204
11.2 地面辐射测试的要求和目标	205
11.2.1 静态和动态 SEU 测试策略	207
11.2.2 错误类型和指导方针	209
11.2.3 硬件设备	212
11.3 数字架构的错误率估计	214
11.3.1 总体方法学	214
11.3.2 一个基于硬件的类 SEU 故障注入策略	215
11.4 结合地面辐射测试和错误注入:一个例子	219
11.4.1 目标处理器:8051 微控制器	219
11.4.2 错误注入结果和错误率预计	221
11.4.3 地面辐射测试结果	222
11.5 更复杂架构的处理	224
参考文献	225
第12章 基于 SEEM 软件的激光 SET 测试和分析	226
12.1 简介	226

12.2 激光诱发 SET	227
12.2.1 模拟器件激光测试	227
12.2.2 混合信号器件激光试验	228
12.3 利用激光试验和 SEEM 软件进行 SET 分析	229
12.4 结论	233
参考文献	233

第 1 章 空间辐射环境

Jean - Claude Boudenot

THALES, RD 128, 91767 Palaiseau Cedex (法国)

(jean - claude. boudenot@ thalesgroup. com)

摘要：辐射带、太阳耀斑和宇宙射线是空间辐射环境的来源。辐射带内的电子、质子和日冕层大规模喷射释放的质子会对电子器件产生总剂量效应，而宇宙射线以及太阳耀斑中的重离子会对电子器件产生重离子效应。在本章第一部分，首先回顾这些辐射效应。在本章第二部分，将会对影响低轨卫星的原子氧环境、太阳紫外射线、微流星体以及人造空间碎片环境进行阐述。

1.1 空间辐射效应

1.1.1 空间辐射环境：范艾伦带、太阳耀斑、太阳风和宇宙射线

地球及其邻近的环境受到大气层的保护，大气层相当于半渗透型的屏蔽层，能够让光线和热量透过，而阻挡宇宙射线和紫外线。因为这样的自然保护在空间有限，人类和电子器件必须能够应对一系列由辐射环境造成的危害。

我们的讨论对象仅限于空间常见的辐射环境，并将这些现象按照来源划分为四类：辐射带、太阳耀斑、太阳风和宇宙射线。尽管这些划分方法是人为规定的（四种辐射环境有时是相互重叠的），但是这种划分方法对于后续对相关辐射效应的研究是有益的。请注意，我们关心的粒子环境是不同来源的电子、质子和重离子，它们具有不同的能量。电子和质子主要产生总剂量效应；重离子和质子产生一系列特殊的效应，这些效应被归类为单粒子效应（Single Event Effect, SEE）。

1. 辐射带

辐射带包含俘获电子和质子。俘获电子分为内带电子和外带电子。内带电子的能量小于 5MeV。外带电子能量高达 7MeV。另外，外带电子的通量的波动程度以及通量的强度都要大于内带电子。值得指出的是，在 1991 年 3 月 24 日出现了地球磁暴，此时人们发现了第三个辐射带。该辐射带位于原辐射带内带和外带之间，其中包含的电子能量可达 30MeV。

辐射带俘获的离子环境中还包含一个内质子辐射带。同时,在1991年3月24日的磁暴期间,人们发现了第二个这样的质子辐射带,其中质子能量可达100MeV。强烈的磁暴会产生新的辐射带,其寿命不确切估计可达2年以上。

如同电子和质子一样,重离子也会被磁层俘获,这个辐射环境被称为ACR或异常宇宙射线,这种现象很早就被发现了。1991年,Grigorou推论如果离子能量低于50MeV/核,离子就可以被磁层俘获。这个推论在1993年的SAMPEX卫星的测试结果中得到了证实。这个离子带主要是由轻质的粒子(He、C、N、O、Ne等)产生的,而且这些离子具有很低能量。俘获的离子易受太阳活动的影响,具有很低穿透能力,基本不会对电子器件产生影响。但是要注意的是,这些离子对宇航员具有一定的辐射危害:会对人体产生较高的生物学效应,表现为高等等效剂量辐射危害。

2. 太阳耀斑

太阳黑子的活动周期为11年,按照对人类活动的影响程度,这个周期又可粗略地划分为四个低活动年和7个高活动年。有两类事件与本书介绍的辐射环境相关,其一为日冕物质喷射,这个过程持续7天,抛洒出高能质子(可达几百MeV)。具有标志性的事件是1972年8月发生的太阳质子爆发。当时正值第20次太阳活动周期,超过30MeV的质子中84%的部分来自于这次事件。第二类事件为一些瞬态事件或者短时脉冲事件,这些过程主要抛洒出重离子。太阳耀斑中的高能离子具有每核几十MeV到几百GeV的能量,只发生一次电离,不同的事件产生的离子成分不同,详细结果可参见1977年9月和1989年10月24日的重离子耀斑。

3. 太阳风

太阳日冕的温度很高(约为 $2 \times 10^6 \text{ K}$),可以将电子加速到足够高的能量而脱离太阳引力的束缚,从日冕中喷射而出。从日冕中喷发电子会导致电荷不平衡,从而诱发质子和重离子的喷发。最终形成一种稀薄的等离子体,且具有极高的温度。在这种稀薄的等离子体中的离子是均匀分布的。等离子体的能量密度超过它的磁场强度,使得太阳磁场在等离子体中是“冻结”的。这个电中性的等离子体以300~900km/s的速度流出太阳表面,其温度为 $10^4 \sim 10^6 \text{ K}$ 。其中离子能量范围为0.5~2keV/核。太阳风中的离子密度为 $1 \sim 30 \text{ g/cm}^3$ 。太阳风中离子的成分为 P^+ 占95%、 He^{++} 占4%、其他重离子比重小于1%。同时其中还存在等电量的电子,以保证电中性。

受太阳风密度(太阳耀斑)、太阳风速度(日冕物质喷/抛射)和太阳内嵌磁场方向变化的影响,地磁场会发生扰动。日冕物质抛射和太阳耀斑会造成太阳风的扰动,这些扰动与地球磁层发生交互作用会导致地磁暴和地磁亚暴。磁暴的频次与太阳活动的强度密切相关,较大规模的地磁暴与日冕物质抛射的关系更加

密切。在太阳活动极大年,太阳磁场的扰动明显,这些扰动会造成地磁场线的压缩。当地磁场线出现压缩时,地球向阳面的等离子体就会被推向地球表面。当等离子体接近地球表面时,电子和离子就会受到地球磁场作用而发生转向,这样的结果使得位于当地时间午夜和上午6点之间轨道上的航天器会遭遇大量的高能电子。从而可以得出一个结论,当地时间午夜和上午6点之间轨道上的航天器运行安全是最值得关注的问题。

而在地球同步轨道上,正常情况下,等离子体温度很高(平均值为:电子约2keV,离子约10keV),密度低($10 \sim 100/\text{cm}^3$),在地磁暴期间其温度上升(平均值为:电子约10keV,离子约14keV),但密度下降($1/\text{cm}^3$);低地球轨道上,等离子体温度低并且不具有产生充电的能力。另外由于高能粒子能够沿着地磁场线运动,因此高轨道的高能等离子体也可能影响到低轨道如极地轨道航天器的运行。通过原位观察显示,极地轨道上的电子可以被加速约几千电子伏,产生的等离子环境可造成严重的充放电现象。这些等离子体被限制在极区附近一个环形的区域,在这个区域磁场线进入低轨道高度。因为航天器仅仅是周期性地穿越这个区域,所以在极区的充电过程是极短的。一般的低能量等离子能够起到中和电荷的作用,而且密度较高,充电现象越能够得到缓解;而在高能量低密度等离子体环境中,这种中和效应就较低,而在这种环境下,航天器表面充电更为严重。

4. 太阳风:产生的效应和消除方法

材料的光吸收和光电子发射特性不同,同时接收到的太阳辐照的程度也会出现差异,局域效应会产生非均匀的电子分布,这些因素会造成航天器绝缘体表面的电位差(这个现象称为差异表面充电)。另外,如果电子能量足够高,可以射入热防护层内部,这会引发表面和部件内部的充电。航天器上典型的绝缘体有电缆外皮、非接地的包覆层、热控涂层、密封材料等。更高能量的电子将穿透子系统底盘部件,将电荷沉积在电路板上、线缆绝缘层上、连接器上、电容上等。在这个过程中,高能电子穿透电路板元件和器件,在绝缘材料内形成内建陷阱电荷,这个过程称为深度绝缘体充电。

消除上述充电现象的方法包括使用金属线网阻止放电产生的瞬态脉冲,使用表面覆盖层(涂层等)和一些能够消除沉积电荷的材料。利用屏蔽层对敏感的器件或材料进行保护,从而降低高能电子的入射通量也是值得建议的方法。

5. 宇宙射线

宇宙射线是由高能离子核组成的。在实际情况下,宇宙线包含1%的重核离子、83%的质子、13%的氦核和3%的电子。这些辐射离子的来源还未被完全确认。我们所知的是这些离子中一部分来自银河系的外部,其余的来自于银河系内部。宇宙射线中的离子能量非常高(大多数离子能量可达 $3 \times 10^{20} \text{ eV}$,接近

50J), 而人们对这些离子的加速机制还不能全面了解。银河射线在到达磁层附近时近似各向同性。但是一旦这些射线离子与地磁场发生耦合, 各向同性就不再保持。银河宇宙线的离子成分与星系中的离子成分近似一致, 看来这是受到了星际间物质作用的影响。低于 1GeV/核 的粒子束通量与太阳活动有关。

1.1.2 剂量效应: 产生原因、对电子器件的影响、辐射强度

空间环境中遇到的总剂量效应几乎都归因于辐射带的俘获电子和太阳耀斑发射的质子。

电离总剂量的评估。评估电子元器件受到的总剂量, 人们通常通过剂量沉积曲线来描述, 这个曲线主要是描述电子或质子穿过不同厚度屏蔽层(通常模型为空心铝球体)后沉积到元器件中的剂量。这条曲线通常被用作规范, 因为在计算剂量率时通常要按照航天器任务进行评估。然后考虑指定的电子元器件在航天器中的确切位置以及不同的屏蔽层(如航天用绝缘体、印制电路插件和壳体部件等)利用这条曲线对剂量率进行计算。通常, 可以通过两种方法计算, 其一为基于“区域分析”的解析法, 即通过剂量剖面的权重加和计算, 即积分法。另一种方法是 Monte - Carlo 法。

轨道的影响。在低地球轨道上 ($300 \sim 5000\text{km}$), 辐射粒子的空间分布不均匀: 外电子辐射带在高纬度(极区形成的号角形区域)接近地表, 在南大西洋中心区有一个高密度的辐射带粒子区域(主要是电子和质子)。这就意味着:

- 1) 位于低赤道轨道 (300km) 的航天器受到的辐射量较小。
- 2) 在倾角小于 45° 的低轨道的航天器会受到南大西洋异常区的影响(SAA)。
- 3) 在倾角大于 55° 的低极地轨道的航天器(即太阳同步轨道航天器)既会受到南大西洋异常区的影响也会受到极区号角形区域的影响。
- 4) 在轨道高度超过 1400km (即星座卫星)会受到剂量效应的强烈影响。质子辐射带的总剂量效应会对卫星产生进一步的影响, 使得卫星承受的总剂量要超过地球同步轨道的剂量。

在地球同步静止轨道 (36000km 高度) 和中地球轨道 ($5000 \sim 36000\text{km}$) 总剂量辐射的主要来源是外电子带。比如, 地球同步轨道上服役 18 年, 经 5mm 铝屏蔽后其接收到的累积剂量为 100krad 而经 10mm 铝屏蔽的剂量为 10krad 。屏蔽盒对电子的屏蔽效果十分突出, 因此在这样的轨道上采用屏蔽盒进行局域屏蔽是十分有效的(作为比较, 2000km 高度的卫星, 经 10mm 铝屏蔽后, 5 年接收到的总剂量在 300krad 的范围)。

剂量效应: 辐射强度。电子器件所能承受的总剂量与器件工艺水平有关。标准 CMOS 货架产品所能承受的总剂量为 1 至几十 krad , 而加固的 CMOS 器件的抗

总剂量水平可达 100krad ~ 1Mrad。标准双极型器件的抗总剂量水平优于标准 CMOS 器件, 可达几十 krad 到 100krad。GaAs 器件本身具有优秀的抗总剂量辐射能力, 可达 1 Mrad 或者更高。但是人们需要特别注意以下的物理因素, 因为总剂量效应还受很多相关因素的影响, 如①剂量率 (双极型工艺下会出现低剂量率增强效应, 相反 MOS 工艺下会出现高剂量率增强效应); ②辐射前后的偏置条件; ③辐射后的恢复时间 (退火和恢复); ④其他的许多因素。

1.1.3 位移效应: 产生原因、对电子器件的效应、辐射强度

高于 1400km 的低轨道飞行器会受到辐射带质子产生的原子位移效应的影响。这个效应与军事服役的武器遭受中子辐射后产生的效应相似, 目前为止, 这种辐射效应在空间中或多或少被忽略。质子辐射带中出现了越来越多的新轨道, 航天工业不得不将质子诱发的位移效应列入辐射分析的范畴。位移效应是采用非电离能量损失 (Non Ionizing Energy Loss, NIEL) 来定量描述的, 这是相对于电离剂量的一个物理量, 值得注意的是质子不同于电子, 是有质量的电荷, 因此质子辐射既可产生电离效应也会产生位移效应。

各种器件所能承受的位移相应的量级如下: CCD 和光联器件能够承受 10^{11} n (相当于 1MeV 中子) / cm^2 ; 双极型器件能承受 10^{12} n (相当于 1MeV 中子) / cm^2 ; MOS 器件可承受 10^{14} n (相当于 1MeV 中子) / cm^2 ; GaAs 能承受 10^{15} n (相当于 1MeV 中子) / cm^2 。

举个例子, 低地球轨道上 1400 ~ 2000km 的高度上, 位移损伤的量级为 $10^{12} \sim 3 \times 10^{12}$ n (相当于 1MeV 中子) / cm^2 。这个位移损伤数量是与屏蔽厚度无关的。对于高集成度的模拟器件, 如 CCD 和光纤陀螺, 这种轨道辐射效应需要着重考虑。

1.1.4 重离子效应: 产生原因、对电子器件的效应、辐射强度

重离子在物质中运行轨迹为直线。离子质量越大, 在其运行轨迹上沉积的电离能量越多。事实上, 利用线性能量沉积 (Linear Energy Transfer, LET) 这个物理量可对重离子的电离能力进行描述。线性能量沉积表述为每单位轨迹长度内沉积的电离能, 一般 LET 值随离子的原子序数增加而增大。不同能量的不同离子的 LET 值可以通过计算得出, 在进行此类计算时, 我们首先要注意的是, 目前已知的最大 LET 值为 $100\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 。当离子穿过器件的敏感区时, 就会在其轨迹上电离出电荷, 在电场作用下, 这些电荷会被收集, 产生离子电流。离子电流会产生多种影响:

1) 单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU), 这是一种瞬态效应, 对存储器影响较大。