



★ ★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

国防现代化建设

空间科学与技术研究丛书

Single Event Effects of
Electronic Devices and
Integrated Circuits

电子器件和集成电路 单粒子效应

曹洲 安恒 高欣 编著

电子器件和集成电路 单粒子效应

曹 洲 安 恒 高 欣 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统阐述了电子器件和集成电路空间单粒子效应的基本概念和原理,试验测试的基础理论与方法,单粒子效应对电子系统的影响及防护设计的基本方法,空间单粒子翻转率计算方法及不确定性分析等方面的内容。全书共分为7章,主要包括:诱发单粒子效应的空间辐射环境,介绍了能够诱发产生单粒子效应的几种空间辐射因素;辐射与半导体材料的相互作用,论述了重离子、质子及脉冲激光与半导体材料的相互作用过程;单粒子效应机理,主要对常见单粒子现象产生的基本过程和特征进行了分析说明;单粒子效应测试,详细介绍常见单粒子效应(SEU、SEL、SEB、SEGR、SET、SEFI)测试方法及辐射模拟源,包括有关试验及加固保障测试标准与方法;单粒子效应对器件及系统特性的影响,介绍了单粒子效应引起的系统故障及其模拟注入分析方法;单粒子效应减缓设计,介绍了常见单粒子效应(SEU、SEL、SEB、SET、SEFI)诱发系统故障的防护设计方法;单粒子翻转率计算,介绍了单粒子翻转率计算中涉及的环境因素、模型和方法及不确定度分析等。

本书适用于从事航天器电子系统设计、航天器电子元器件可靠性保证设计验证和集成电路抗辐射加固设计等方面的工程及科研技术人员阅读,也可作为高等院校飞行器设计、集成电路设计等相关专业的研究生、教师的教材和教学参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电子器件和集成电路单粒子效应 / 曹洲, 安恒, 高欣编著. — 北京: 北京理工大学出版社, 2021.3
ISBN 978-7-5682-9656-4

I. ①电… II. ①曹… ②安… ③高… III. ①电子器
件-单粒子态-研究②集成电路-单粒子态-研究 IV.
①TN②O571.24

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第049828号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号
邮 编 / 100081
电 话 / (010) 68914775 (总编室)
(010) 82562903 (教材售后服务热线)
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>
经 销 / 全国各地新华书店
印 刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司
开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16
印 张 / 29.75
字 数 / 518千字
版 次 / 2021年3月第1版 2021年3月第1次印刷
定 价 / 138.00元

责任编辑 / 陈莉华
文案编辑 / 陈莉华
责任校对 / 刘亚男
责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- | | |
|-----|-----------------|
| 于 全 | 中国工程院院士 |
| 王 越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏东林 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 苏哲子 | 中国工程院院士 |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士 |



- 李伯虎** 中国工程院院士
- 李应红** 中国科学院院士
- 李春明** 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉** 国际宇航科学院院士
- 李得天** 国际宇航科学院院士
- 李新亚** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿** 中国工程院院士
- 杨德森** 中国工程院院士
- 吴伟仁** 中国工程院院士
- 宋爱国** 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦** 电气电子工程师学会会士、英国工程技术
学会会士
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆军** 中国工程院院士
- 陆建勋** 中国工程院院士
- 陆燕荪** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈谋** 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚** 中国工程院院士
- 陈懋章** 中国工程院院士
- 金东寒** 中国工程院院士
- 周立伟** 中国工程院院士



- 郑纬民 中国工程院院士
- 郑建华 中国科学院院士
- 屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
- 项昌乐 中国工程院院士
- 赵沁平 中国工程院院士
- 郝 跃 中国科学院院士
- 柳百成 中国工程院院士
- 段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 侯增广 国家杰出青年科学基金获得者
- 闻雪友 中国工程院院士
- 姜会林 中国工程院院士
- 徐德民 中国工程院院士
- 唐长红 中国工程院院士
- 黄 维 中国科学院院士
- 黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 黄先祥 中国工程院院士
- 康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
- 焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授
- 谭春林 航天系统开发总师



前 言

太空宇宙射线中高能重离子入射到航天器用集成电路的半导体材料中时，将会在半导体材料内产生局部密度极高的电子-空穴对，这种局部密度极高的电子-空穴对在半导体中被敏感 PN 结所收集后，会产生瞬态电流脉冲，这种过程会对半导体材料或集成电路造成电离损伤，形成通常所谓的单粒子效应。单粒子效应是由单个重离子或质子引起的局部瞬态电离现象而导致半导体器件或集成电路逻辑状态发生变化、寄生结构电路导通等现象。当单个高能重离子入射到器件表面时，沿入射离子径迹产生的高密度电子-空穴对被器件敏感结（PN 结）所收集，当电荷收集数量达到一定程度时，就会诱发半导体器件或集成电路发生电离瞬态现象和局部电离损伤。常见的这种瞬态和局部电离损伤有单粒子翻转（SEU）、单粒子锁定（SEL）及单粒子烧毁（SEB）和栅击穿（SEGR）等，这些现象通常称为单粒子效应。目前实验室和航天器空间飞行观测到的单粒子效应有多种形式，如逻辑器件、模/数转换器和存储器中的单粒子翻转（SEU）、CMOS 电路的单粒子锁定（SEL）、功率器件的单粒子烧毁和栅击穿（SEB 和 SEGR）等。一般来说，单粒子效应可以分为软错误和硬错误两大类。单粒子软错误定义为单个带电粒子诱发电路的逻辑状态发生变化，而器件在复位或重写后仍可恢复原来的逻辑状态，器件本身没有物理上的永久性损伤；单粒子硬错误指单个带电粒子在器件中的电离过程诱发器件产生物理上永久性损伤或破坏。如单粒子锁定（SEL）就是单个高能离子电离过程触发了 CMOS 电路中存在的寄生可控硅结构而使其导通后，电路中电流持续增加，形成大电流而烧毁器件。又如单粒子烧毁（SEB）是单个高能离子产生的电离过程触发了电路中寄生的双极性晶体管导通后，引起雪崩击穿过程而使电路失效。单粒子效应产生的电路逻辑状态变化或永久性损伤会使星载电子设备工作反常或失



效, 严重地威胁着卫星在轨的正常运转及寿命, 据 NSAA 对欧美现有卫星在轨故障统计, 有 33% 的故障为空间辐射损伤引起, 这其中就包括单粒子效应诱发的电子系统故障。有关资料表明, 单粒子效应诱发的卫星故障是在轨卫星面临的一个十分严重的问题, 如欧洲地球资源卫星 ERS-1 某一精密测距仪由于携带的 NEC 公司 64 K CMOS 静态存储器发生单粒子锁定后导致该设备失效, 又如 TOPEX Poseidon 卫星上的雷达高度计中使用的电子器件发生单粒子锁定后, 雷达高度计的电源功率以及处理单元的温度突然上升, 遥测被关闭, 使之断电后重新加电, 仪器正常工作, 但丢失了几天的测量数据。

星载电子设备及系统中采用了许多电子器件和集成电路, 如体硅 CMOS 电路由于其功耗低等特点, 广泛应用在星载电子设备中, 但其固有的寄生 PNP 结构导致了空间应用时的单粒子锁定现象。又如功率 MOSFET 器件应用在卫星电源系统上时, 其内部寄生的双极性晶体管会被空间高能离子触发产生单粒子烧毁现象。随着卫星技术的发展, 电子系统可靠性的要求不断提高, 空间带电粒子 (宇宙射线重离子、太阳射线重离子、高能质子) 在星载电子设备中诱发的单粒子效应防护是卫星系统设计师必须解决的问题, 因为这种现象一旦发生将引起电子设备系统故障或损坏整个设备系统, 导致整个卫星系统不能正常工作或结束工作寿命。鉴于此, 国内外许多研究机构和航天器研制单位在卫星系统设计中, 针对空间飞行航天器用电子器件和集成电路的单粒子现象, 开展了许多地面模拟试验研究工作和加固设计评估的试验验证工作; 试验研究中除采用重粒子加速器外, 还开发了其他方便的地面模拟试验手段来完成单粒子效应的加固设计评估, 如脉冲激光单粒子效应试验设备等; 另外, 在模拟试验的基础上, 也研究了针对单粒子效应的加固设计方法, 并应用在航天器电子设备及系统的加固设计中。

三十多年来, 从开始认识基本电路的空间单粒子翻转, 到今天对新型电子器件和集成电路单粒子效应新现象的认识和理解, 人们在单粒子效应这个领域进行了许多方面的研究工作, 取得了很大成绩, 为航天器工程设计做出了贡献, 也逐渐形成了一门涉及多学科交叉的技术基础理论和学科。

1962 年, Wallmark 和 Marcs 假定了电子电路中存在单粒子翻转现象; 1975 年, Binder 和 Smith 认为美国某一通信卫星上 JK 触发器的反常跳转是由于银河宇宙射线中的高能离子所诱发。1978 年, May 和 Woods 第一次在实验室观察到由 α 粒子所引起的动态随机存储器 (DRAM) 中的单粒子翻转现象, 同年, Pickel 和 Blandford 观测到在轨卫星上电子器件中的单粒子翻转。从 20 世纪 80 年代开始, 单粒子效应的研究成为空间辐射效应和卫星系统设计等多领域关注的焦点, 研究十分活跃, 取得了许多基础理论和工业设计方面的研究成果,



时至今日，由于电子器件和集成电路技术的不断发展，研究工作仍方兴未艾。单粒子效应的研究主要包括空间高能带电粒子环境、效应基本机理特征和防护设计技术三个方面，三个方面的研究已取得了明显的应用成果。在环境方面，已基本搞清空间重离子成分、能量范围等；20世纪90年代初，已着手研究动态的空间高能离子环境，即太阳耀斑暴发所带来的重离子环境变化及其影响特征。在效应特征研究方面，不但搞清了电子器件和集成电路中产生单粒子效应（SEE）的基本机理和物理过程，还开发出了计算SEU率的程序软件。也发现了许多新的单粒子效应现象，并对其进行了分类研究，如单粒子翻转中的多位翻转、单粒子锁定（SEL）、单粒子烧毁（SEB）、单粒子栅击穿（SEGR）、单粒子急返（SES）等。1979年，Kolasinski等第一次在试验中发现了由高能重离子诱发的CMOS电路之锁定现象；1983年，Soliman进一步开展了研究工作；1990年，Jonston用激光脉冲探索了CMOS器件的单粒子锁定现象。1986年，Waskiewicz领导的研究小组在实验室首次发现由铷源裂变碎片引起的功率MOSFET单粒子烧毁现象，此后国际上十分重视星用电子电路单粒子硬错误（SEL、SEB、SEGR等）研究，20世纪90年代，在轨卫星上也实时观测到了多次CMOS电路的单粒子锁定诱发的卫星设备故障和MOSFET器件的单粒子烧毁现象。如1991年，Goka等人报道了在日本工程试验卫星上观察到了较为严重的单粒子锁定现象，中国“实践四号”科学试验卫星也观察到了单粒子锁定现象；1996年，美国高级光电子试验卫星（APEX）上观测到了单粒子烧毁现象。20世纪90年代末以来，针对单粒子硬错误的地面模拟试验研究和加固设计方法研究显得十分活跃。1999年，美国宇航公司的Koga研究小组针对DC/DC变换器中采用的脉宽调制器（PWM）进行了单粒子烧毁的试验研究，发现脉宽调制器在重离子作用下存在单粒子烧毁（SEB）和单粒子功能中断（SEFI）两种硬错误现象，当器件发生单粒子硬错误后，器件失去调制控制信号，DC/DC变换器失效。在加固技术研究方面，元器件级的加固技术有长足的进步，国外有些厂商已能提供具有单粒子锁定加固的专用器件；系统级上的加固技术研究也已开始起步。总之，在单粒子效应研究中，虽然针对单粒子翻转的基本理论和技术基础已趋成熟，但针对新器件单粒子效应的研究工作中仍面临着极大的挑战，这主要表现在以下几个方面。

第一，根据地面模拟试验结果，电子设备空间单粒子翻转率可以从工程上进行评估；但对空间发生单粒子硬错误概率大小的计算方法仍未见报道，单粒子硬错误模拟试验和评估方法也需进一步开展研究工作，而且当星用器件或部件变得越来越复杂、特征尺寸变得越来越小时，空间环境中的高能质子和重离子诱发的硬错误会越来越严重地威胁着元器件或部件，乃至整个电子设备的正



常工作，甚至寿命；因而，单粒子效应新现象的研究仍有开拓性的工作可做。

第二，标准单粒子翻转（SEU）模型不能应用在单粒子硬错误发生概率的计算分析上，在不同试验结果之间进行比较分析时，会发现预示结果存在着较大差异。由此而带来一些挑战性的问题，首先，SEU 预估方法（如 CRÈME 程序、SPACE RADIATION 软件包等）仍需在理论分析和模拟试验的基础上进一步改进完善。这种预估方法应用在空间电子设备发生单粒子硬错误率的计算中时，需要比较完善的硬错误计算模型，这就要求在单粒子硬错误重离子模拟试验方面开展大量研究工作。

第三，单粒子效应地面模拟研究除了采用重离子环境模拟外，尚需开发其他模拟手段，如激光模拟单粒子锁定现象的试验研究等。另外，硬错误的测试方法也是很重要的一个环节，有些复杂的电子部件（如 DC/DC 变换器）或设备，其效应的测试与其工作状态密切相关，不同工作状态下，效应的测试方法不同；因而，全面表征硬错误效应特征的测试技术是急待解决的一个问题。举例来说，针对功率 MOSFET 单粒子烧毁的测试，有破坏性测试和非破坏性测试两种方式，破坏性测试将使被测器件损坏，获得空间烧毁概率计算用的烧毁截面曲线要损坏许多器件，这对工程设计而言是难以实现，且数据离散性大，所以必须开发非破坏性测试方法，这样针对一个器件或部件就可获得烧毁截面，以便预示空间发生烧毁概率的大小。

第四，单粒子效应模拟试验是进行其计算机仿真分析的基础，全面系统地理解星用电子电路的单粒子硬错误现象，才能很好地实现单粒子效应的计算机仿真，也为未来实现对付单粒子效应危害的专家系统打下基础。

空间辐射环境中带电粒子诱发单粒子效应的软错误通常会造卫星各种电子系统发生逻辑错误或功能异常，而硬错误则直接导致卫星电子器件永久性损伤或破坏。因而集成电路和电子器件在用于卫星之前，为了得到其单粒子效应特性，必须结合预定轨道的辐射环境，对已采取的加固措施和方法进行验证；或是对卫星上出现的故障进行地面复现，都需要开展单粒子效应地面模拟试验。多年来，国内外针对卫星工程设计中采用的元器件、典型电子电路和计算机系统进行了许多单粒子效应模拟试验研究，形成了星用电子器件和集成电路（如 A/D 转换器、SRAM、CPU、功率 MOSFET 器件）单粒子效应的模拟试验方法和验证评估手段，为航天器电子元器件以及集成电路的单粒子效应加固设计评估提供了必要的技术保障。

本书系统地深入地阐述了电子器件和集成电路空间单粒子效应的基本概念和原理，试验测试的基础理论和方法，单粒子效应对电子系统的影响及防护设计基本方法，空间单粒子翻转率计算及不确定性分析等方面的内容。全书共分



为7章, 主要内容包括: 诱发单粒子效应的空间辐射环境; 辐射与半导体材料的相互作用; 单粒子效应机理; 单粒子效应测试; 单粒子效应对器件及系统特性的影响; 单粒子效应减缓设计; 单粒子翻转率计算。

本书的主要目的是希望读者在理解单粒子效应产生机理的基础上, 明确单粒子效应测试试验的一般要求; 通过单粒子效应对器件及系统特性的影响分析, 掌握单粒子效应减缓设计方法; 并在一定试验数据基础上, 采用相关计算方法和软件包, 能够对电子器件和集成电路空间单粒子效应发生频度进行计算分析。

本书适用于从事航天器电子系统设计、航天器电子元器件可靠性保证设计验证和集成电路抗辐射加固设计等方面的工程及科研技术人员阅读, 也可作为高等院校飞行器设计、集成电路设计等相关专业的研究生、教师的教材和教学参考书。

由于编著者水平有限, 加之内容涉及多个技术学科, 书中错误和不足之处在所难免, 欢迎广大读者批评指正!

在本书的编写过程中, 兰州空间技术物理研究所的张晨光、庄建宏等提供了部分资料并参与了撰稿和图表的规范化工作, 在此表示感谢! 感谢北京中质联合卓越质量咨询中心的刘勇先生在本书形成过程中提供的支持与帮助! 赵光平女士在本书的编写筹划和申请出版方面做了许多工作, 在此表示衷心感谢!

值此书出版之际, 特别要感谢抗辐射加固技术专业组多年来对编著者所从事研究工作的支持和指导, 没有他们的帮助, 本书的形成是无法实现的。

编著者



目 录

第 1 章 诱发单粒子效应的空间辐射环境	001
1.1 银河宇宙射线	003
1.2 太阳风和太阳活动周期	007
1.3 太阳粒子事件	010
1.4 辐射带高能质子	013
1.5 南大西洋异常区高能质子	015
参考文献	016
第 2 章 辐射与半导体材料的相互作用	019
2.1 辐射与半导体材料相互作用的基本过程	021
2.1.1 重离子线性能量传输值 LET 和射程 R	023
2.1.2 重离子与半导体材料相互作用过程的空间尺度	027
2.1.3 重离子与半导体材料相互作用过程的时间尺度	028
2.2 重离子在半导体硅材料中的电离径迹结构	030
2.2.1 Katz 理论	030
2.2.2 电荷径向分布轮廓 (径向剂量计算)	032
2.2.3 重离子径迹结构的经验模型	035
2.3 聚焦脉冲激光束在半导体硅材料中的电离径迹结构	038
2.3.1 一般性物理描述	038
2.3.2 激光诱发的电子-空穴对产生率	040
2.4 质子与半导体硅材料的相互作用	042



2.4.1	高能质子与硅材料核反应过程	044
2.4.2	质子与硅材料核反应反冲核	046
2.4.3	反冲核的 LET 值分布	048
2.5	不同模拟源的等效性问题	051
2.5.1	重离子诱发的电子-空穴对产生率	052
2.5.2	LET 值等效计算中的非线性引入误差分析	053
2.5.3	线性等效激光 LET	054
	参考文献	056
第 3 章	单粒子效应机理	059
3.1	概述	061
3.2	单粒子翻转机理	067
3.2.1	单粒子翻转现象物理描述	068
3.2.2	敏感节点的电荷收集	070
3.2.3	单粒子翻转敏感性与特征尺寸关系	078
3.3	单粒子瞬态机理	085
3.3.1	单粒子瞬态现象描述	085
3.3.2	单粒子瞬态的产生及传播	087
3.3.3	传播过程的脉冲加宽特性	091
3.3.4	单粒子瞬态脉冲湮灭及电荷共享	095
3.3.5	总剂量对单粒子瞬态的影响	097
3.3.6	温度效应	102
3.4	单粒子锁定机理	104
3.4.1	单粒子锁定现象物理描述	107
3.4.2	单粒子锁定与温度的关系	114
3.5	单粒子烧毁机理	117
3.5.1	单粒子烧毁现象物理描述	117
3.5.2	单粒子烧毁与漏-源电压的关系	119
3.6	单粒子栅击穿机理	122
3.6.1	单粒子栅击穿现象物理描述	123
3.6.2	单粒子栅击穿的半经验模型	126
3.6.3	薄层电荷模型	129
3.7	单粒子功能中断机理	131
	参考文献	133



第 4 章 单粒子效应测试	145
4.1 单粒子效应测试概论	147
4.1.1 测试系统的主要功能	148
4.1.2 测试软件设计一般要求	148
4.1.3 静态偏置测试方法	149
4.1.4 黄金芯片比较法	150
4.1.5 准黄金芯片法	152
4.1.6 松散式耦合系统法	152
4.2 单粒子翻转测试	153
4.2.1 器件偏压和数据形态设置	154
4.2.2 器件工作模式选择	154
4.2.3 器件温度及控制	156
4.2.4 入射离子能量与角度	157
4.3 单粒子瞬态测试	158
4.3.1 单粒子瞬态测试方法及原则	159
4.3.2 基于芯片的内嵌式 SET 脉宽测试	163
4.3.3 基于芯片外的 SET 脉宽测试	165
4.3.4 单粒子瞬态测试举例	167
4.4 单粒子锁定测试	170
4.4.1 单粒子锁定主要特征	170
4.4.2 单粒子锁定测试原理	171
4.4.3 测试系统方案设计	174
4.5 单粒子烧毁测试	176
4.5.1 破坏性测试方法	177
4.5.2 非破坏性测试方法	178
4.5.3 测试系统方案设计	179
4.6 单粒子栅击穿测试	184
4.7 单粒子功能中断测试	188
4.7.1 SDRAM 器件的单粒子功能中断测试	188
4.7.2 微处理器的单粒子功能中断测试	193
4.8 单粒子效应试验模拟源	195
4.8.1 重离子模拟源	195
4.8.2 放射性同位素铜源 ^{252}Cf	199



4.8.3	激光单粒子效应模拟试验系统	201
4.9	单粒子效应试验标准简介	202
4.10	加固保障测试	205
4.10.1	质子 SEE 加固保障测试	205
4.10.2	重离子 SEE 加固保障测试	221
4.11	在轨测试数据举例	232
	参考文献	235
第 5 章	单粒子效应对器件及系统特性的影响	239
5.1	单粒子效应造成的系统故障	241
5.1.1	单粒子效应对微处理器系统的影响	242
5.1.2	单粒子效应对 FPGA 系统的影响	254
5.1.3	单粒子效应对数字信号处理系统的影响	265
5.1.4	单粒子效应对 SOC 系统的影响	269
5.1.5	单粒子效应对二次电源系统的影响	273
5.2	系统故障模拟注入分析	279
5.2.1	故障模型	280
5.2.2	故障注入流程	281
5.2.3	硬件故障模拟注入	282
5.2.4	软件故障模拟注入	284
5.2.5	模拟仿真故障注入方法	287
5.2.6	混合故障注入方法	290
5.2.7	电路模拟故障注入方法	290
5.3	航天器单粒子故障事例	291
5.3.1	国外航天器单粒子故障	293
5.3.2	国内航天器单粒子故障	297
	参考文献	299
第 6 章	单粒子效应减缓设计	303
6.1	系统设计时面临的问题	307
6.1.1	任务需求分析	308
6.1.2	单粒子效应危害性分析	309
6.2	SEU 减缓设计	310
6.2.1	屏蔽防护方法	311



6.2.2	加固存储单元设计	316
6.2.3	冗余和刷新	324
6.2.4	检错与纠错	329
6.2.5	复杂器件的 SEU 缓解技术	338
6.3	SEL 减缓设计	350
6.3.1	器件工艺与结构的 SEL 防护设计	351
6.3.2	电路板级的 SEL 防护设计	355
6.4	SEB 和 SEGR 减缓设计	361
6.4.1	降额设计的一般要求	362
6.4.2	结合具体应用的降额设计	366
6.5	SET 减缓设计	368
6.5.1	SET 信号屏蔽	368
6.5.2	三模冗余设计	370
6.5.3	逻辑重复	371
6.5.4	时阈冗余	372
6.5.5	驱动晶体管尺寸调整方法	373
6.5.6	动态阈值 MOS 逻辑阵列电路原理	374
6.5.7	共源-共栅电压开关逻辑门电路	376
6.6	SEFI 减缓设计	379
	参考文献	379
第 7 章	单粒子翻转率计算	383
7.1	计算用辐射环境模型	387
7.1.1	银河宇宙射线离子模型	388
7.1.2	太阳耀斑质子模型	391
7.1.3	LET 谱曲线及应用	393
7.2	翻转率计算模型	396
7.2.1	长方形平行管道 (RPP) 模型	399
7.2.2	有效通量模型	403
7.3	翻转率计算方法	404
7.4	翻转截面模型	408
7.5	半经验计算方法	410
7.6	质子单粒子翻转率计算	411
7.6.1	利用质子单粒子翻转截面计算翻转率	411