

WILEY

国防电子信息技术丛书

Single Event Effects in Aerospace

空间单粒子效应

——影响航天电子系统的危险因素

[美] Edward Petersen 著

韩郑生 沈自才 丁义刚 赵发展 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

空间单粒子效应

——影响航天电子系统的危险因素

Single Event Effects in Aerospace

[美] Edward Petersen 著

韩郑生 沈自才 丁义刚 赵彦展 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述电子器件在空间环境中的单粒子效应,器件在空间应用时单粒子辐照效应的地面评估方法,及其空间应用时的错误概率计算。全书共 17 章,第 1 章和第 2 章主要介绍电子元器件空间单粒子效应的基础知识;第 3 章至第 5 章对地面模拟空间单粒子效应的试验进行详细介绍、阐述试验数据的分析方法;第 6 章讲述试验数据如何与器件机理进行对应;第 7 章、第 8 章、第 11 章至第 17 章讲述空间单粒子翻转错误率的计算与空间环境中的预估;第 9 章和第 10 章介绍两种特殊的单粒子效应。

本书适合抗辐照电子器件设计工程师、航天系统电子工程师、航天系统可靠性工程师、航天物资部门人员阅读,以了解空间单粒子辐照给电子器件带来的损伤,并通过电子选型或其他措施将损伤降低到最小。

Single Event Effects in Aerospace, 9780470767498, Edward Petersen

Copyright © 2011 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc

All rights reserved. This translation published under license.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

本书中文简体中文字版专有翻译出版版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-6331

图书在版编目(CIP)数据

空间单粒子效应:影响航天电子系统的危险因素/(美)彼得森(Petersen,E.)著;韩郑生等译. —北京:电子工业出版社,2016.3

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Single Event Effects in Aerospace

ISBN 978-7-121-28197-6

I. ①空… II. ①彼… ②韩… III. ①单粒子态 IV. ①O571.24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 033616 号

策划编辑:杨 博

责任编辑:桑 昀

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:505.6 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版

印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译者序

随着科学技术的进步和制造水平的提高,人类探索空间、利用空间资源的活动越来越频繁,而航天器电子系统则担负着人类探索或利用空间过程中的电子信息处理、存储、传输等任务,其组成的核心是各种半导体器件及集成电路。航天器在轨寿命期间,这些半导体器件及集成电路会遭受各种高能粒子的作用,进而导致一系列相关效应的发生,单粒子效应(SEE)就是其中一类非常重要的效应。单粒子效应又可分为非致命性的单粒子翻转(SEU)、单粒子瞬态(SET)、单粒子功能中断(SEFI)等效应,致命性的单粒子闩锁(SEL)、单粒子栅穿(SEGB)、单粒子烧毁(SEB)等效应。对于非致命性的单粒子效应,虽然通过重启电子系统的电源等方式可以使系统恢复到正常状态,但是会严重影响到航天任务的正常执行。致命性的单粒子效应则可能导致核心器件自身的损毁,从而造成整个电子系统的瘫痪,使整个航天任务失败。因此,对宇航用核心半导体器件和集成电路开展单粒子效应研究意义重大。

本书系统地介绍了空间环境、单粒子效应、单粒子效应产生的机理、空间环境效应地面模拟试验方法、辐射环境和半导体器件及集成电路相互作用的建模、单粒子效应对集成电路影响的预示。本书内容丰富,具有非常重要的实用和参考价值。

作者爱德华·彼得森(Edward Petersen)博士长期从事卫星系统单粒子翻转率的预示研究,其研究工作表明可以通过地面模拟试验和理论计算来预测电子系统在空间的翻转率。爱德华博士曾在美国海军研究实验室(NRL)工作,撰写或合著了关于辐射效应方面的论文60篇,大多数涉及单粒子效应。爱德华博士是电气和电子工程师协会院士(IEEE Fellow),以及IEEE核与等离子科学学会(Nuclear and Plasma Sciences Society)的辐射效应奖获得者。

随着我国航天事业的快速发展,以载人航天、月球探测、二代导航、高分辨率对地观测和新一代运载火箭为代表的一系列航天科技工程取得了突破性进展,航天技术整体水平大幅跃升,但与航天强国相比仍有差距。随着新工艺、新技术、新材料、新器件等在航天器上逐渐获得应用,以及航天器长寿命、高可靠性要求的提高,亟须进一步加强宇航单粒子效应研究。相信本书能为从事宇航电子系统、半导体器件和集成电路研发及其可靠性评估考核试验的科技工作者提供有益的帮助。

鉴于译者水平所限,在翻译过程中难免有疏漏之处,恳请广大读者不吝赐教。

译者

2015年7月6日于北京

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 单粒子试验分析	4
1.2.1 数据完整和初始数据修正的分析	4
1.2.2 电荷收集试验分析	4
1.2.3 从截面数据分析器件特性	4
1.2.4 器件敏感性参数研究分析	5
1.3 空间和航空电子设备 SEE 发生率建模	5
1.3.1 器件辐射环境建模	5
1.3.2 器件电荷收集建模	5
1.3.3 用于单粒子翻转的电路特性和电路敏感度建模	5
1.4 本书纵览	6
1.5 本书范围	6
第 2 章 单粒子效应分析和预测基础	7
2.1 单粒子效应概述	7
2.2 粒子能量沉积	8
2.3 单粒子事件环境	10
2.3.1 太阳风和太阳周期	10
2.3.2 磁层、宇宙射线和俘获粒子运动	12
2.3.3 银河宇宙射线	14
2.3.4 地磁场俘获质子	26
2.3.5 太阳事件	28
2.3.6 大气中的电离	30
2.4 电荷收集和翻转	35
2.5 有效 LET 值	37
2.6 电荷收集体积和长方体	37
2.7 翻转截面曲线	37
2.8 临界电荷	39
2.8.1 临界电荷和 LET 值阈值	39
2.8.2 芯片上单极晶体管和双极型晶体管的临界电荷	39
2.8.3 由电路建模研究得到的临界电荷	39
2.8.4 器件截面上的敏感度分布	39
2.8.5 晶格内部的变化	40
2.8.6 临界电荷讨论总结	40
2.9 翻转敏感度和特征尺寸	40

2.10	截面的概念	41
2.10.1	核物理截面的概念	41
2.10.2	单粒子事件截面的概念	44
第3章	用于分析的重离子试验优化	47
3.1	试样重离子试验数据	47
3.2	试验要求	48
3.3	曲线参数	49
3.4	角度步幅	52
3.5	达到饱和截面时停止数据采集	53
3.6	器件遮蔽效应	54
3.7	离子选择	55
3.8	确定器件的LET值	56
3.9	能量损失分布	58
3.10	数据要求	59
3.10.1	需要的精度	59
3.10.2	需要的准确度	60
3.11	试验统计和不确定性	60
3.12	双重阈值效应	60
3.13	截面数据拟合	61
3.14	误差和不确定性的其他来源	62
第4章	质子试验优化	63
4.1	束流强度和均匀性的监测	63
4.2	试验的总剂量限制	63
4.3	截面曲线的外形	64
第5章	数据鉴定和解释	67
5.1	数据特性	67
5.1.1	不合理误差、系统误差及随机误差	67
5.1.2	固有随机误差	68
5.1.3	数据的局部标准偏差	70
5.1.4	数据的废弃	71
5.2	问题数据的处理	72
5.2.1	系统误差检验	72
5.2.2	电压变化实例	80
5.2.3	与LET值不一致的数据	81
5.2.4	束流污染	81
5.2.5	未观测到的事件	83
5.2.6	数据的草率或错误拟合	83
5.2.7	试验监测和计划	85

5.3	重离子试验的解释	85
5.3.1	漏斗改变有效 LET 值	85
5.3.2	真实 RPP 形状的效应	87
5.3.3	确定深度和漏斗长度的拟合数据	90
5.3.4	厚器件结构	92
5.3.5	旋转 RPP 结构的截面曲线	94
5.3.6	截面上的电荷增益效应	94
5.4	使用韦伯尔函数进行最小二乘时可能存在的问题	95
5.4.1	多次好的拟合	95
5.4.2	与韦伯尔拟合不一致的原因	97
第 6 章	不同类型 SEU 数据的分析	100
6.1	临界电荷	100
6.2	厚度和临界电荷	101
6.3	电荷收集机制	101
6.3.1	漂移过程和漏斗	102
6.3.2	扩散过程	102
6.3.3	等离子体线效应	102
6.3.4	ALPHEN(α 粒子源漏穿透效应)	102
6.3.5	双极型晶体管效应	102
6.3.6	复合效应	102
6.4	电荷收集和截面曲线	103
6.4.1	CMOS	103
6.4.2	加固 CMOS	103
6.4.3	双极器件	104
6.4.4	CMOS-SOI	104
6.4.5	NMOS——耗尽型负载	104
6.4.6	NMOS——电阻性负载	104
6.4.7	GaAs HFET	104
6.4.8	GaAs C-Higfet	104
6.4.9	VLSI 工艺的变化	105
6.5	功效(芯片内 SEU 敏感度的变化)	105
6.5.1	截面和功效曲线	105
6.5.2	SEU 功效与面积的关系	106
6.5.3	脉冲激光 SEU 试验获得的功效和 SEU 敏感度	108
6.6	混合模式模拟	112
6.6.1	Warren 的方法	113
6.6.2	Dodd 的方法	114
6.6.3	Hirose 的方法	114
6.6.4	Fulkerson 的简单方法	115

6.6.5	I_{\max} 、 $F(T_{\max})$ 方法	115
6.6.6	翻转率计算的电路级仿真	118
6.6.7	多位翻转区域	118
6.6.8	功效和 SEU 阈值	119
6.6.9	从功效到翻转率	119
6.7	器件敏感度的参数研究	120
6.7.1	数据显示和拟合	120
6.7.2	器件参数和 SEU 敏感度	122
6.8	离子种类和能量的影响	130
6.9	器件形状和极限截面	132
6.9.1	体 CMOS 器件	132
6.9.2	CMOS/SOI	133
6.9.3	SRAM	133
6.10	径迹尺寸效应	133
6.11	截面曲线和电荷收集过程	134
6.11.1	效验曲线和电荷收集过程	135
6.11.2	反 LET 值绘图和扩散	137
6.12	单粒子多位翻转	138
6.12.1	严格的几何形状 MBU	138
6.12.2	质子诱发 MBU	140
6.12.3	单位翻转的多次撞击	140
6.12.4	DRAM 中漫射导致的 MBU	141
6.12.5	接近敏感区的撞击	144
6.12.6	FPGA 的多位翻转	144
6.12.7	扩散 MBU 翻转率的计算	145
6.12.8	EDAC 中几何形状 MBE 率	145
6.12.9	空间环境中的统计 MBE 率	147
6.12.10	几何形状误差对系统性能的影响	148
6.12.11	试验环境中的统计 MBU	150
6.13	逻辑系统中的 SEU	150
6.14	瞬态脉冲	152
第 7 章	宇宙射线单粒子效应率计算	153
7.1	翻转率预估方法简介	153
7.2	重离子翻转率的 RPP 方法	153
7.3	积分 RPP 方法	158
7.4	截面曲线的形状	161
7.4.1	韦伯尔分布	161
7.4.2	对数正态分布	162
7.4.3	指数分布	163

7.5	RPP 方法和 IRPP 方法背后的假设	165
7.5.1	器件相互作用模型	165
7.5.2	临界电荷	165
7.5.3	翻转率计算的数学基础	165
7.5.4	弦长模型	167
7.5.5	Bradford 公式	168
7.5.6	Pickel 公式	170
7.5.7	Adams 公式	170
7.5.8	积分 RPP 方法的公式化	172
7.5.9	HICCUP 模型	173
7.5.10	IRPP 使用的要求	173
7.6	有效通量方法	174
7.7	上限限制模型	174
7.8	品质因子翻转率公式	175
7.9	广义品质因子	176
7.9.1	使用 GEO 翻转率数据进行品质因子修正	177
7.9.2	器件参数的确定	178
7.9.3	从列表的部件参数中计算品质因子	179
7.9.4	屏蔽后的翻转率系数	181
7.10	品质因子和对数正态分布	182
7.11	蒙特卡洛方法	182
7.11.1	IBM 程序	182
7.11.2	GEANT4	182
7.11.3	中子诱发的翻转	183
7.12	PRIVIT	183
7.13	积分通量方法	183
第 8 章	质子单粒子效应计算	185
8.1	核反应分析	185
8.1.1	蒙特卡洛计算	188
8.1.2	基于重离子数据预示质子翻转截面	188
8.2	半经验方法和积分截面计算	189
8.3	质子和重离子翻转间的关系	191
8.4	利用质子翻转截面进行的品质因数修正	192
8.5	少见的高能质子反应导致的翻转	193
8.6	阻止的质子、氦离子和铁离子导致的翻转	193
第 9 章	中子诱发单粒子翻转	200
9.1	中子诱发航空电子设备中的翻转	200
9.1.1	BGR 计算	200
9.1.2	积分截面计算	201

9.1.3	品质因数计算	201
9.1.4	上边界法	203
9.1.5	飞行中的暴露	203
9.2	地面的翻转	203
第 10 章	重离子核反应产生的翻转	205
10.1	重离子核反应	205
10.2	电离和核反应综合翻转率计算	206
10.3	重核离子反应总结	208
第 11 章	重离子翻转率预测实例	209
11.1	低阈值研究	209
11.2	韦伯尔函数和对数正态分布的翻转率比较	210
11.3	低阈值-中 L_c 数据	213
11.4	SEE 敏感性和 LET 阈值	214
11.5	翻转率计算的选择区域和深度	218
11.5.1	SOI 器件	219
11.5.2	CREME 计算中包含漏斗	219
11.6	CREME96 代码的计算	219
11.6.1	CREME96/FLUX	220
11.6.2	CREME96/TRANS	221
11.6.3	CREME96/LETSPEC	221
11.6.4	CREME96/HUP	221
11.6.5	CREME96 结果	222
11.7	CREME-MC 和 SPENVIS	223
11.8	截面的不确定性对翻转率的效应	223
第 12 章	质子翻转率预测	225
12.1	俘获质子	225
12.2	质子诱导翻转率与 FOM 的关系	225
第 13 章	综合环境	227
13.1	质子和宇宙射线翻转率的相对关系	227
13.2	利用品质因数进行综合翻转率计算	228
13.3	特定新轨道的翻转率系数	230
13.4	地球附近任意圆轨道的翻转率系数	231
13.5	近地圆轨道质子和重离子翻转率的比值	233
13.6	从地面到外空的单粒子效应	233
第 14 章	太阳粒子事件和极端情况下的示例	235
第 15 章	中性粒子束环境翻转率	238
15.1	中性粒子束武器的特征	238

15.2	中性粒子束翻转率	239
第 16 章	空间单粒子翻转率的预测和观测	241
16.1	空间观测的结果	241
16.2	环境的不确定性	248
16.3	异常值的检测	251
16.4	较差翻转率预测的可能原因	251
16.5	一篇好的单粒子发生率比较论文的组成	252
16.5.1	实验室和空间测试结果的报告	253
16.5.2	地面测试结果的分析	253
16.5.3	空间预测的环境	254
16.5.4	翻转率计算	254
16.5.5	空间试验和数据的特征	255
16.6	总结	255
16.7	近来的比较	256
16.8	太阳活动期间事件的比较	256
第 17 章	IRPP 方法的局限性	257
17.1	IRPP 和深器件	257
17.2	需要两次撞击时的 RPP 方法	257
17.3	忽略径迹尺寸的 RPP 方法	257
17.4	利用 IRPP 计算总的单粒子效应数, 而不是单粒子翻转数	258
17.5	忽略敏感体积外效应的 RPP 方法	258
17.6	假设具有相同 LET 值的不同粒子的效应相等的 IRPP 方法	258
17.7	假设粒子的 LET 值在敏感体积中不变化的 IRPP 方法	258
17.8	假设电荷搜集不随着器件方向而改变的 IRPP 方法	259
17.9	单粒子效应发生率分析的现状	259
附录 A	常用参数	260
附录 B	参考方程式	261
附录 C	利用品质因数开展翻转率的快速估计	266
附录 D	部分特性	268
附录 E	器件数据来源	270
参考文献	271

第1章 绪 论

1.1 背景

近年来,单粒子效应(Single Event Effect, SEE)系列已成为空间电子设备辐射效应中的主要因素。单个电离粒子穿过电子器件的敏感节点时就发生了单粒子效应。单粒子事件表面上可能导致随机地出现电子系统的小故障——可能导致从扰动系统响应(最好情况)到灾难性的系统失效(最坏情况)的错误。由于其随机特性、空间高能粒子无所不在、器件小型化导致的SEE敏感度增加等因素的综合作用,问题变得特别复杂。

单粒子效应是伴随着电子器件的设计朝着更高的器件密度和更小的特征尺寸的趋势发展而出现的现象。这种趋势使得信息处理更快,需要的电荷量更低。当涉及的电荷降低时,宇宙射线或 α 粒子穿过半导体时就能够产生相应数量的电荷。这一电荷看上去像是合法的信号,却暂时改变了存储器的内容或指令流中的命令。

单粒子翻转现象于1962年由Walkmark首次提出^[Walkmark 1962],1975年Binder, Smith和Holman^[Binder 1975]首次报道了应用卫星系统中出现的这一效应。由于其建议在当时的辐射效应研究的主流之外,因此,这两个报告都被忽视了。但在1978年,May和Wood报道了 α 粒子导致的动态RAM翻转^[May 1979],而Pickel和Blandford^[Pickel 1978]分析了重离子宇宙射线导致的空间RAM电路的翻转。在这一时期IBM利用 α 粒子放射源和地面宇宙射线时断时续地开始了一些项目^[Ziegler 1979, Ziegler 1981, Ziegler 1996a, and Ziegler 2004]。1979年,Guenzer, Wolicki, Allas^[Guenzer 1979], Wyatt, McNulty及其同事^[Wyatt 1979]在试验中观测到了高能质子导致的翻转,这与地球俘获质子带中的翻转类似。逐渐地,当航天器上观测到越来越多的翻转相关问题时,人们才认识到单粒子翻转(Single Event Upset, SEU)对系统操作是一个非常严重的威胁。器件的抗辐射加固和抗SEU方法可以从某种程度上减轻问题,但问题仍然很严重。未来所有空间、导弹和航空系统中都必须考虑单粒子翻转的影响。

这种效应的早期“常识”来自两篇论文。Binder, Smith和Homan的论文给出了宇宙射线导致的翻转的基本信息^[Binder 1975]。该论文讨论了基础机制和电路效应、宇宙射线环境和屏蔽效应,以及计算宇宙射线单粒子事件发生率的基本方法。Petersen的论文给出了质子环境随高度的变化、南大西洋异常区的影响及屏蔽效应^[Petersen 1981]。该论文还讨论了硅中不同质子反应的可能贡献,并给出了质子诱发翻转率的计算结果。

下列进展推动了对单粒子效应的研究:

- 旅行者和先锋号探测器上宇宙离子导致的严重错误;
- 由于对单粒子翻转的高度关注,Landsat D和伽利略系统花费了极大的代价进行了必要的改进;
- 在穿越地球辐射带时哈勃太空望远镜的导航系统出现错误,需要频繁地清除并重新载入导航系统;

- SEU 导致的操作错误致使日本卫星“Superbird”丢失^[AWST 1992]。

表 1-1 列出了受到单粒子效应影响的其他空间项目的实例。这些事件中的一部分由 Bedingfield 及其协作者收集^[Bedingfield 1996]。Ritter 也讨论了部分事件^[Ritter 1996]。

表 1-1 受到单粒子效应影响的部分航天器

1970—1982 年期间			
DE-1	Galileo	INSAT-1	Intelsat-IV
Landsat-D	LES 8	LES 9	Pioneer Venus
SMM	Tiros-N	Voyager	
1982—1990 年期间			
AMTE/CCE	DSCS	ERBS	Galileo Lander
GEOS-6	GEOS-7	Geosat	GPS 9521
GPS 9783	GPS 9794	HUT	IUS
MOS-1	OPEN	Shuttle	SPOT-1
TDRS-1	TDRS-4	UOSAT-2	
1990—1997 年期间			
COBEERS-1 (SEL)	ETS-V (SEL)	ADEOS	
EUVE	HST	HST-STIS	Kitsat-1
NATO-3A	PoSAT-1	S80/T	SOHO
SPOT-2	SPOT-3	STS-61	Superbird
TDRS-5	TDRS-6	TDRS-7	Topex/Poseidon
UoSAT-2	UoSAT-3	UoSAT-5	WIND
Yahkoh-BCS			
业余无线电卫星试验			
AO-16	LO-19	IO-26	Spartan/OAST/SPRE

Ziegler 也给出了地基系统的类似问题清单。辐射导致的软错误是数字电路可靠性的主要限制^[Ziegler 2004]。这一现象比现在计算可靠性的所有其他诱因加起来更为重要。由于许多人认为芯片的单粒子事件发生率 (Single Event Rate, SER) 是一项法律责任 (卖出你知道可能失效的某样物品), 本领域的公共文献很稀少, 这也使得管理者总是紧张不安^[Ziegler 2004]。

空间的 SEU 起源于自然环境中的两种辐射源。地球同步轨道及外辐射带之外相应区域的航天器经历的翻转起因于宇宙射线或太阳耀斑的重离子。天然宇宙射线离子通量大约为 100 粒子/(平方厘米·天)。对非常敏感的器件这一通量会导致每日发生翻转。许多器件在这种环境中的翻转率大约为 10^{-6} 次/(比特·天)。

在质子辐射带中也会出现翻转。尽管质子直接电离的能量损失率太低, 不能使大多数器件翻转, 但质子在硅中诱发的核反应会导致大多数存储单元翻转的重反冲核。大约 10^5 个质子中有一个会出现足以导致 SEU 的核反应。考虑到能够引起这种核反应的质子数量之大, 质子会诱发翻转成为一个重要的 SEU 机制。在辐射带的核心地带, 能量大于 30 MeV (大约是能够穿透航天器并引发翻转的最低能量) 的质子的通量大约为 $10^7 \sim 10^9$ 个/(平方厘米·天)。因此, 例如质子翻转截面为 10^{-11} cm^2/bit 的 1 K 存储器在辐射带最强烈的区域每天会出现 10 次翻转。

当宇宙射线穿过大气时, 存在产生高能中子和质子的核反应链。额定数字是在 40 000 英尺高度、纬度 45° 时中子数约为 6000 个/(平方厘米·小时)。20 世纪 90 年代, 人

们证实了这些粒子能使航空设备的复杂集成电路产生单粒子翻转。

有多种可能的单粒子效应(SEE)存在。由于这些效应会导致在空间电离辐射环境中工作的微电子器件工作不正常,因此它们都很重要。基本效应包括翻转、瞬态、锁定,但其他效应也需要记住。具体效应如下所示。

SEU	单粒子翻转	存储器或控制位的临时改变
SET	单粒子瞬态	单粒子事件导致的瞬态
SEL	单粒子锁定	器件锁定在高电流状态下
SES	单粒子快反向	NMOS 器件中的反馈电流模式
SEB	单粒子烧毁	器件激起高电流并烧毁
SEGR	单粒子栅击穿	功率 MOSFET 的栅极损伤
SEFI	单粒子功能中断	翻转导致控制回路损坏
MBU	多位翻转	同一事件导致多位翻转

单粒子事件得名于单个粒子的作用就可以产生这种效应。许多其他辐射效应依赖于大量粒子的沉积剂量或损伤。单个重离子穿过就可导致 SEE,例如,空间的单个宇宙射线。当宇宙射线穿过器件中的硅时,会留下离子径迹。空间宇宙射线的能量很高,足以穿透器件。如果所产生的这些离子位于自然或电子器件应用电场中,就会被器件电极所收集,如图 1-1 所示。这会产生一个电脉冲或信号,对器件来说,可能是一个响应信号。如果器件的电特性确实有此响应,即此信号似乎有效,就会出现位翻转或在逻辑器件中产生触发器件锁定的信号。

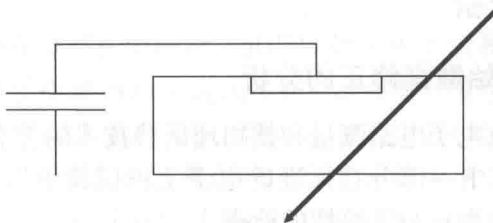


图 1-1 重离子直接穿透电离路径

高能质子也能引发单粒子效应,但不是质子穿过产生这个效应。质子自身产生的电离非常少。几乎没有器件有足够的敏感性,能对质子电离有响应。但是,在硅器件中大约 10^5 个质子中有一个会产生核反应。这些核反应会产生能量足以导致翻转的重离子,如图 1-2 所示。尽管这似乎是非常小概率的事件,但是空间质子辐射带的质子强度足够高,会导致比同样环境下的重离子多得多的翻转。

对重离子和质子引发的翻转,基本概念都是相同的。当前工作中主要的重点在重离子引发的翻转上。后面也将讨论质子和中子的翻转以做比较。单粒子效应发生率的预测依赖于现象中涉及的多方面的大量独立模型。

单粒子效应也被认为是支持墨菲定律的自然方式之一。这种效应可能在任意时间、电子系统中的任意位置发生。SEE 不依赖于空间环境的累积暴露,在发射后或很短时间内,和长时间在轨后一样,都有可能发生。对于发生的位置,一位空间系统设计师的一句悲观的话如此说:“谁都知道将发生翻转,但我不希望在那一位置上发生翻转。”

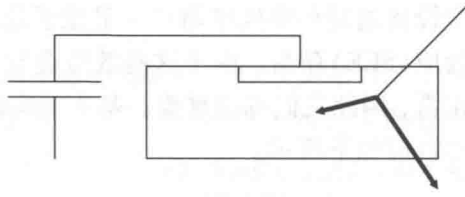


图 1-2 质子在器件中反应离子化路径

由于空间系统因宇宙射线离子导致的这些效应和其他实际的世界性难题，对集成电路的单粒子错误的认识就成为空间应用中集成电路部件设计和验证的重要组成部分。

由于器件尺寸变小，在空间或卫星应用中使用更密集、功能更强的集成电路，问题变得更为严重。电子电路达到了这样的集成水平，一位的信息以极少量的电荷来代表，噪声容限非常紧凑。例如，典型的动态随机存储器 (Dynamic Random Access Memory, DRAM) 在存储电容为 100 fF (10^{-15} F) 的位存储节点上噪声容限约为 100 mV ，而这一噪声值对应于仅仅 $62\ 500$ 个电子的电荷。入射宇宙射线对这一微妙平衡的任何扰动都是不能容忍的，因此，针对那种恶劣的环境，认识并了解空间辐射涉及的电子电路的效应是必不可少的。单粒子效应建模对理解已有系统中观测到的错误的机制以及新设计系统的单粒子错误预测具有关键的作用。

需要关注以下两个不同的方面。首先是分析不同单粒子效应试验以帮助理解这一现象。其次是对单粒子效应中的各个方面建模，以预测空间的 SEE 发生率。

1.2 单粒子试验分析

1.2.1 数据完整和初始数据修正的分析

单粒子效应试验涉及电子电路测量和核物理试验技术的综合应用。这导致在测量中存在许多可能的误差，其中一部分在标准的电子工程试验中不会普遍出现。因此，SEE 数据分析的第一步就是数据自身完整性的检查。

数据的某些方面反映了试验方法造成的假象。数据在用于分析和预示之前必须进行修正。

1.2.2 电荷收集试验分析

在 SEE 的初始研究中，假设需要特定量的电荷来产生这种效应。这对应于用阶跃函数来表征器件的敏感度与能量沉积的函数关系。能量沉积是以电离粒子的线性能量传输 (Linear Energy Transfer, LET, 参见 2.2 节) 来测量的。但是，所有的试验都指出 SEE 发生率随 LET 值的变化关系曲线为 S 形。最开始假设这是由存储单元到存储单元的变化所导致的。其后许多电荷收集试验和理论研究表明：敏感度的变化与晶体管和存储单元上的变化相对应。

1.2.3 从截面数据分析器件特性

SEE 截面曲线是 SEE 涉及的不同电荷收集过程和电路特性的反映。对这一曲线特性的研究有助于分析特定器件涉及的工艺。

1.2.4 器件敏感性参数研究分析

在器件试验中,有许多器件参数可以调整。这些参数可能影响器件设计,或者是空间工作的不同模式相关的因素。试验截面随参数的变化给出了空间 SEE 发生率对这些因素的依赖性的直观测量。

1.3 空间和航空电子设备 SEE 发生率建模

1.3.1 器件辐射环境建模

辐射环境建模涉及空间质子和重离子辐射环境建模及大气中的中子环境建模(本书中经常提到空间中的建模,实际上讨论的都是针对空间和航空环境)。来源包括宇宙射线、太阳粒子和地磁俘获辐射。基本参数包括强度、元素成分和能量分布。器件上的环境受到包围器件的屏蔽材料成分、地磁屏蔽效应(依赖于轨道参数)、太阳周期相关的时间变化等因素的影响。对重离子的单粒子效应而言,重要的是环境的能量损失特性。因此,宇宙射线成分和能量的变化被转换成粒子数与单位长度上的能量损失(dE/dX)的函数关系,这被称为线性能量传输值(LET 值)。LET 值谱可以以微分形式(给定能量损失下的粒子数)或积分形式(能量损失大于给定 LET 值的粒子数)来表示。

1.3.2 器件电荷收集建模

翻转依赖于电子电路探测到的电荷量,也即依赖于离子沉积的电荷量。离子直接撞击器件或器件中的单个原子核对 SEE 来说还不够,还需要有合适的径迹长度。沉积的电荷量依赖于路径长度和离子 LET 值的乘积。因此,必须对器件的敏感体积建模。也就是说,必须知道器件敏感区的面积、深度和形状。有了这些信息,就可以对器件中可能的路径长度分布建模。这些路径长度分布可表示为微分或积分形式,也就是给定长度的路径的数量或者超过或等于给定长度的路径的数量。

事实上会出现几种可能的电荷收集过程,因此电荷收集很复杂。电荷可能被器件自身沿径迹的本底和应用电场所收集;也可能作为扩散进器件的电荷被收集;还有可能是电场沿离子径迹发生扭曲,导致额外的径迹电荷被带入器件。

1.3.3 用于单粒子翻转的电路特性和电路敏感度建模

嵌入器件的电路确定了应用脉冲在看上去像正常电信号时应该是什么形状。大多数情况下,这些效应都可使用标准的 SPICE 电路仿真软件进行建模。某些情况下,在电荷收集和电路间有更复杂的相互作用,如果统一考虑,会更好地对这些效应建模。

现实中不是总能得到足够多的器件详细特性的信息来进行电路仿真的。目前通常利用实验室的翻转试验测量结果来预估器件敏感度。

空间中 SEE 发生率的预测依赖于三个基本因素的建模:环境、器件尺寸和器件敏感度。如果涉及器件敏感体积和形状以及电荷收集的详细信息,模型可能会复杂化。本书

将对发生率预测的不同方法进行分析,检查这些模型如何包含基本因素和复杂因素。

将要讨论的建模复杂化的其中一项就是器件中电荷收集的处理。所有模型中都包括了电荷收集的基本内容。但是,也有许多对试验数据的解释有明显影响的可能的复杂因素。这些因素有时也影响发生率预测。这些因素将在合适的地方进行介绍。

1.4 本书纵览

首先将给出对单粒子效应测量、发生率建模和预测有重要作用的不同因素和方法的概述。然后逐步展开发生率预测中的重要概念,揭示发生率预测的历史,概述已开发的方法,给出正在开发的标准。同时对试验结果的解释进行广泛的讨论,并讨论仍遗留的某些问题。

器件中的电荷收集是可能的复杂因素之一。所有模型中都包括了电荷收集的基本内容。我们将考虑在截面测量中展示出的电荷收集过程,但不考虑问题的各种详细的微模型方法。

本书还将给出近年来推荐和使用的单粒子现象计算机仿真涉及的方法和程序的概述。这些程序的目标是对辐射环境和微电子电路的相互作用建模,并对 IC 正确操作造成的影响进行预测。

本书基于已出版的资料,也包括了部分新资料和新实例。我们希望某些实例对本领域的初学者有用。其他实例针对本领域中对翻转率计算的集成长方体方法(Intergral Rectangular Parallele Piped, IRPP)有误解的经验丰富的研究人员。

1.5 本书范围

本书是一本覆盖了单粒子效应和发生率预测中的基本术语和概念的教材。本书基于 2008 NSREC 短期教程的注释以及补充、修改和索引^[Petersen 2008b]。作者希望能提供足够的信息,以便于读者找出特定主题相关的文献并进一步研究。本书对问题基础中遇到的、对 SEU 测量或对 SEU 测量结果的处理非常重要的某些问题进行了深入讨论。本书将注意力放在电子工程课程中不包括的核物理的许多试验方面。某些章节对读者来说可能太过深入,读者可根据需要跳过这些章节。

本书对器件或电路的实际效应几乎没有讨论。可能可以针对本书中没有涉及的单粒子效应电路方面的建模和仿真编写一本书或重点综述类的论文^[Fleetwood 2004, Laco 2008, Munteanu 2008, Pease 2008]。劳埃德·麦森吉尔在某个 IEEE NSREC 的短期教程中很好地给出了电路建模^[Massengill 1993c]。塞克斯顿的短期课程也受到了大力推荐^[Sexton 1992]。布莱克和霍尔曼对麦森吉尔的结果进行了非常好的修正^[Black 2006]。里德讨论了电效应中潜在的某些基础物理问题^[Reed 2008]。

在重要的 IEEE NSREC 短期教程及其他综述论文中包含了丰富的信息^[Benedetto 2008, Bourdarie 2008, Hafer 2008, Munteanu 2008, Petersen 2008b, Reed 2008, Wilkinson 2008, Kastensmidt 2007, Ladbury 2007a, Black 2006, Law 2006, Santin 2006, Xapsos 2006b, Bauman 2005, Buchner 2005, Cressler 2003, Oldham 2003, Weatherford 2002, Buchner 2001, Hoffmann 2000, Dodd 1999, Dressendorfer 1998, Barth 1997, Petersen 1997b, Alexander 1996, Galloway 1996, Ritter 1996, Stapor 1995, Normand 1994a, Massengill 1993c, Sexton 1992, McNulty 1990, Petersen 1983c, Pickel 1983],希望对单粒子效应有全面了解的读者应研究这些信息。同时,读者应知道知识在不断变化。本书中的信息相比 1997 年的相应信息已经有了明显的变化^[Petersen 1997b]。