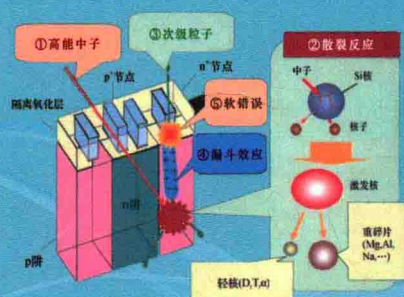


大气中子

在先进存储器件中引起的软错误

Terrestrial Neutron-induced Soft Errors in Advanced Memory Devices



【日】中村刚史 马场守 伊部英治 矢作康夫 龟山英明 著
陈伟 石绍柱 宋朝晖 王晨辉 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

大气中子在先进存储器件中 引起的软错误

Terrestrial Neutron-induced Soft Errors in Advanced Memory Devices

[日] 中村刚史 马场守 伊部英治 著
矢作康夫 龟山英明

陈伟 石绍柱 宋朝晖 王晨辉 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-099号

图书在版编目(CIP)数据

大气中子在先进存储器件中引起的软错误/(日)
中村刚史等著;陈伟等译. —北京:国防工业出版社,
2015.8
书名原文:Terrestrial Neutron-Induced Soft Errors in
Advanced Memory Devices
ISBN 978-7-118-10284-0

I. ①大… II. ①中… ②陈… III. ①中子—研究
IV. ①O572.34

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第171895号

Copyright© 2008 by World Scientific Co. Pte. Ltd. All rights reserved. This book, or parts thereof, may not be reproduced in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or any information storage and retrieval system now known or to be invented, without written permission from the Publisher.

Simplified Chinese translation arranged with World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.

本书简体中文版由 World Scientific Co. Pte. Ltd. 授权国防工业出版社独家出版发行。版权所有,侵权必究。

大气中子在先进存储器件中引起的软错误

[日] 中村刚史 马场守 伊部英治

矢作康夫 龟山英明 著

陈伟 石绍柱 宋朝晖 王晨辉 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路23号 100048

经售 新华书店

印刷 北京京华虎彩印刷有限公司

开本 710×1000 1/16

印张 14 $\frac{3}{4}$

字数 276千字

版印次 2015年10月第1版第1次印刷

印数 1—1000册

定价 89.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序

高能宇宙射线与大气层中分子相互作用,产生大量中子,会在半导体存储器中引起软错误,导致电子系统可靠性下降。特别是随着电子器件集成度的不断提高,器件特征工艺尺寸减小到超深亚微米和纳米水平,大气层中子引起的单粒子效应会变得越来越严重,因此掌握大气层中子单粒子效应的物理机理,预估其危害并采取相应的加固措施,对于临近空间飞行器和飞机的可靠性和安全性具有重要意义。

日本东北大学的 Takashi Nakamura、日立有限公司的 Eishi Ibe 和瑞萨公司的 Hideaki Kameyama 共同编著的 *Terrestrial Neutron - induced Soft Errors in Advanced Memory Devices* 一书,详细介绍了大气层中子在先进存储器件中引起的单粒子效应的研究内容。书中涵盖了大气层中子辐射环境、中子探测原理、中子辐照模拟装置、中子引起的单粒子效应物理机理、实验方法、数值模拟,以及国际上的一些标准规范等。

西北核技术研究所的陈伟研究员主持了本书的翻译,编译人员均长期从事空间辐射效应研究工作,对物理概念、实验方法和技术的理解准确,译文流畅。此书中译本的出版,必将会对技术人员进一步理解大气中子单粒子效应机理、模拟、实验、仿真和加固起到重要作用。

该书所涉中子辐射环境模拟和测量、中子单粒子效应实验和预估等内容,既有基本原理,又有标准规范的应用,可以为从事单粒子效应专业研究的工程师、研究人员,以及高等院校相关专业的研究生、大学生提供参考。

中国科学院院士
抗辐射加固技术专业组顾问

吕 敏

2014 年 8 月于北京

译者序

当前,微电子器件的特征尺寸不断减小,集成度不断提高,单粒子效应变得越来越敏感。宇宙射线在大气层中产生的中子,会引起先进存储器件出现单粒子翻转等错误,有可能对航空飞行器的安全可靠飞行造成威胁,因此大气中子单粒子效应得到了国内外抗辐射加固技术领域的关注。

本书由日本东北大学的 Takashi Nakamura、日立有限公司的 Eishi Ibe 和萨瑞公司的 Hideaki Kamayama 编著,详细介绍了宇宙射线产生的大气层中子辐射环境、几种典型的中子能谱和剂量探测器、中子单粒子翻转截面的中子实验方法、中子单粒子效应模拟的蒙特卡罗模型、国际上最新的一些实验标准规范以及加固方法。

本书内容丰富、信息量大、指导性强,是一部集基础理论和实用技术为一体的专著,不仅对从事抗辐射加固技术研究的科研人员具有很好的参考价值,对新加入该领域的研究人员了解单粒子效应也提供了必备的基础知识。希望该书中译本的出版可供国内同行借鉴参考。

作为本书的第一译者,我主持了本书的翻译。其中,第1章、第8章、第9章由我、王晨辉、陈西子翻译,第2章、第4章由宋朝晖、张侃、谭新建翻译,第3章、第5章、第6章、第7章、附录由石绍柱翻译,最后我负责统稿和审校。

中国科学院吕敏院士于百忙之中进行了指导并为本书作序。西北核技术研究所的邱孟通、龚建成、郭晓强、郭红霞、林东生、张小东、翁秀峰对本书的翻译提出了宝贵的修改意见。国防工业出版社为本书的出版发行提供了大力支持。在此一并表示衷心感谢。

由于译者水平有限,译本中不妥和错误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

陈 伟

2014年8月于西北核技术研究所

前言

大气中子在半导体存储器件中引起的软错误是当前可靠性方面存在的主要问题之一。理解其机理和量化地面辐射环境中的软错误率对于半导体技术至关重要。半导体器件、部件和系统设计以及质量保证等相关领域的科学家和工程师,都需要了解中子引起软错误的基本知识。应该说现代 IT 行业中普遍的关键技术都与这些器件、部件和系统有关。

本书涵盖了大气中子引起的软错误的相关内容,目的是为读者提供认识中子引起软错误的基本知识。本书特色如下:

(1) 在地面采用几种类型的中子探测器对大气中子能谱和剂量进行了连续测量,对中子能谱和剂量的变化进行讨论,并介绍了大气中子能谱和加速器散裂中子能谱的区别。给出了 SRAM 和 DRAM 在大气环境下的野外实验结果,与野外不同测试点所测大气中子能谱的变化情况相一致。

(2) 综述了各种 SRAM 和 DRAM 器件在 $1 \sim 800\text{MeV}$ 宽的中子能谱范围内单粒子翻转情况。第一次系统描述了用于获得单粒子翻转截面作为中子能量的函数的准单能中子实验方法。

(3) 单粒子翻转截面的阈值能量通过威布尔分布曲线拟合数据给出。第一次发现阈值能量低于 1MeV ,比在硅中的非弹性散射阈值能量低得多。此外,还解释了这个阈值的反应机理。

(4) 通过介绍一种新的非线性逆卷积方法,证实了通过利用散裂中子(连续谱)束进行单粒子翻转实验的结果,单粒子翻转截面可以作为中子能量的函数获得。这些与能量相关的截面与(准)单能中子实验结果非常一致。利用这种逆卷积技术,人们可以在世界各地的各种散裂中子装置的实验结果中获得相吻合的一组单粒子翻转截面,尽管不同的装置中子能谱不同。

(5) 介绍了一种蒙特卡罗模拟模型,用于模拟与中子诱导软错误相关的整个物理过程。该模型可以应用于任何核子(中子/质子)辐射场,包括加速器和大气辐射场。该模型通过大气场和加速器实验进行了验证。利用模拟中的 3D 器件模型,得到了非对称多位翻转、部件材料效应、能量阈值等方面的独特结果。

(6) 介绍了实验方法国际标准的最新发展情况,包括美国标准 JESD89A、89-1、89-3,以及日本指南 EDR4705。

本书由 9 章组成,内容具体安排如下:

● 第 1 章 绪论

本章回顾了大气中子诱导单粒子效应(SEE)和单粒子翻转(SEU)对存储器特别是 SRAM 的影响,解释了 SEE 的物理机制,并介绍了本书的总体结构。

● 第 2 章 大气中子能谱与剂量

介绍了用于大气中子测量的中子探测器,如多慢化体谱仪(Bonner 球)、Phoswich 型探测器、有机液体闪烁体、雷姆仪等。给出了大气中子能谱和剂量的顺序测量结果,包括相关环境数据。还介绍了中子剂量随海拔和地磁变化的情况,并讨论了其他影响中子剂量的重要参数。

● 第 3 章 大气层辐照实验

介绍了测量大气中子软错误的方法和设备,描述了用于估计软错误率(SER)的 χ^2 分布方法,并介绍了对 SER 率进行归一化的纠正方法。

● 第 4 章 中子辐照实验装置

给出了世界上现有两种基于加速器的中子装置的参数:使用 p-Li 及其他反应的(准)单能中子装置,以及产生连续能谱的散裂中子装置。

● 第 5 章 实验数据的评述与讨论

介绍了使用(准)单能和散裂中子束装置的常用实验方法。利用各种测量数据,介绍了尾纠正、威布尔拟合、展开、多位翻转(MCU)分类等相关分析技术。还介绍了作者提出的中子单粒子软错误评估系统(SECIS)框架。

● 第 6 章 蒙特卡罗模拟方法

介绍了一种蒙特卡罗模拟模型,用于与中子软错误相关的整个物理过程,该模型在程序包 CORIMS/SEALER 中执行。模型可以应用于任何核子(中子/质子)辐射场,包括加速器和大气辐射场。还介绍了研究复合材料效应的初步方法。

● 第 7 章 模拟结果及其意义

利用大气场和加速器实验结果对模型进行了验证。利用逼真的 3D 器件模型,给出了非对称多位翻转、部件材料效应和能量阈值方面的结果。

● 第 8 章 中子实验方法的国际标准

介绍了实验方法相关国际标准的最新发展情况,包括美国标准 JESD89、JESD89-1、JESD89-3、JESD89A 和日本指南 EDR-4705。

● 第 9 章 总结和展望

简要总结全书内容,描述了本书没有涉及的一些话题,以及未来需要开展的重要工作。

致谢

感谢 Uppsala 大学 TSL 的 Per. Ulf Renbergh 博士和 Alexander Prokofiev 博士、LANSCE 的 Steve A. Wender 博士和 Bruce Takala 博士,Osaka 大学的 Yasuki Nagai

教授和 Nobuyuki Matsuoka 博士,感谢他们在实验方面的有益讨论和支持。日本原子能局的 Tatsuhiko Sato 博士和 Munehiko 博士、JCAC 的 Kazunori Nagaoka 博士、JAXA 的 Haruhisa Matsumoto 博士以及富士电机系统公司的 Tomoya Nunomiya 博士提供了重要的宇宙射线中子数据。德州仪器的 Robert Bauman 博士、思科系统公司的 ShiJie Wen 和 Soon S. Chung 博士、Sun 微系统公司的 Charlie Slayman 先生、英特尔集团的 Norbert Seifert 博士、iRoc 技术公司的 Olivier Lauzeral 先生、Kyushu 大学的 Yukinobu Wantanabe 教授、富士有限公司的 Yoshiharu Tosaka 博士、NEC 的 Hiroshi Furuta 先生、索尼公司的 Hajime Kobyashi 博士提供了宝贵的评论,改进了我们的工作。还要感谢 Renesas 技术公司的 Masatoshi Sato 先生、Tasuke Tanaka 先生和 Masato Ikeda 先生,Elpida 存储器公司的 Mitsumori Hidaka 先生和 Atsushi Saito 先生。特别感谢劳伦斯·伯克利国家实验室的 Lawrence Heilbronn 博士,感谢他在文字方面提供的大力支持。

Takashi Nakamura

日本东北大学

Eishi Ibe

日立有限公司

作者简介

中村刚史 (Takashi Nakamura), 日本东北大学荣誉教授, 日本辐射理事会主席, 多家日本公司顾问。

伊部英治 (Eishi Ibe), 日本日立公司生产工程研究实验室首席研究员, IEEE 会员, JESD89 任务小组亚太地区负责人, JESD89 的任务是制定中子引起的半导体器件软错误测试方法标准。

马场守 (Mamoru Baba), 日本东北大学回旋加速器与辐射同位素中心教授, 日本辐射安全管理学会主席。

矢作康夫 (Yasuo Yahagi), 日立生产工程研究实验室高级研究员, 日本应用物理学会会员。

龟山英明 (Hideaki Kameyama), 瑞萨 (Renesas) 技术公司质量管理部经理, IEEE 会员。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 单粒子效应机制概述	3
1.3 定量评估方法概述	6
第 2 章 大气中子能谱与剂量	8
2.1 引言	8
2.2 中子探测方法	9
2.2.1 多慢化体谱仪(Bonner 球)	9
2.2.2 有机液闪谱仪	12
2.2.3 剂量当量计数器(雷姆仪)	14
2.2.4 叠层闪烁探测器	17
2.3 实验方法	22
2.3.1 地面海平面高度的中子连续测量	22
2.3.2 机载和高山条件下的中子测量	26
2.3.3 数据分析	31
2.4 结果与讨论	33
2.4.1 大气压的影响	33
2.4.2 中子能谱	34
2.4.3 中子周围剂量当量率的时序结果	43
2.4.4 中子通量均值和周围剂量当量均值	46
2.4.5 纬度、海拔高度和太阳活动导致的变化	48
2.4.6 宇宙射线中子能谱的计算	55
2.5 结束语	60
第 3 章 大气层辐射实验	62
3.1 实时 SER	62
3.2 统计和失效时间估计方法	63

3.2.1	置信度	63
3.2.2	软错误率失效时间	64
3.3	存储器实时 SER 评估系统概述	65
3.3.1	存储器概述	66
3.3.2	实时 SER 评估系统概述	68
3.4	实时 SER 实验环境	70
3.4.1	大气中子能谱与注量的时空变化	70
3.4.2	实时 SER 实验的地磁经度、纬度和高度	71
3.4.3	白天、夜间和月度大气剂量变化	73
3.4.4	在实时 SER 实验过程中监测中子剂量	76
3.5	实时 SER 实验前准备	78
3.5.1	样品选择	78
3.5.2	待测器件的准备与放置方向	78
3.5.3	实验项目验证	79
3.5.4	实验点的有效中子通量	79
3.5.5	实时 SER 实验点	79
3.6	噪声对实时 SER 和中子剂量率的影响——野外实验示例	80
3.6.1	水泥衰减长度	81
3.6.2	野外海拔依存度验证	82
3.6.3	野外中子剂量率与中子诱导软错误之间的关系 ^[3.26]	83
3.6.4	环境中的等效中子剂量率	84
3.6.5	RTSER 与中子诱导软错误率的多位翻转比率间的比较	87
3.6.6	美国实验点 SER 实验得出的多位翻转与异常噪声分析 ^[3.26]	89
3.6.7	太阳风的影响与中子剂量率变化之间的关系	90
3.6.8	SER 实验后雷姆仪工作情况的检查	91
3.7	小结	92
第4章	中子辐照实验装置	94
4.1	中子辐照实验装置中使用的中子源概述	94
4.2	20MeV 以下的单能中子源	95
4.2.1	14MeV 中子源	96
4.2.2	日本东北大学快中子实验室不同能量的中子源 ^[4.7]	97
4.2.3	英国国家物理实验室的可变能量中子源 ^[4.10]	101
4.3	20MeV 以上的准单能中子源	102
4.3.1	${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})$ 和 ${}^9\text{Be}(\text{p}, \text{n})$ 中子源	102
4.3.2	${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n})$ 中子源的能谱及强度	104

4.3.3	利用 $^7\text{Li}(p,n)$ 中子源进行 SEU 实验	107
4.3.4	实验的尾部修正方法 ^[4.31, 4.32]	112
4.4	散裂中子装置	114
4.4.1	散裂中子源概述 ^[4.3, 4.34]	114
4.4.2	美国新墨西哥州的洛斯·阿拉莫斯国家实验室	115
4.4.3	加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华三角大学的介子装置 ^[4.40]	116
4.4.4	日本大阪大学的核物理研究中心 ^[4.41, 4.42]	118
4.4.5	不同散裂中子源中子通量的比较	118
4.5	小结	119
第5章	实验数据的评述与讨论	120
5.1	单能中子实验与 SEU 激励方程	120
5.1.1	文献报道的 SEU 截面	120
5.1.2	利用单能和准单能中子源进行的 SEU 敏感性辐照实验	122
5.1.3	SEU 能量阈值测量及其重要性	129
5.2	SEU 激励方程的应用	132
5.2.1	散裂中子辐射实验与逆卷积方法	132
5.2.2	利用 LANSCE 散裂中子源进行的实验	134
5.2.3	利用单能和准单能中子束验证 SER 估计方法	136
5.2.4	通过散裂中子实验获取 SEU 方程	138
5.2.5	SER 评估体系框架——SECIS	140
5.3	MCU 分析	141
5.3.1	MCU 率及其中子峰值能量依赖关系	141
5.3.2	MCU 率和 MCU 的频率分布函数	142
5.4	小结	146
第6章	蒙特卡罗模拟方法	148
6.1	核反应模型	148
6.2	器件模型	150
6.2.1	单元模型和基本的电荷收集机制	150
6.2.2	MCU 模型	152
6.2.3	模拟无限单元矩阵的动态单元变换方法	152
6.2.4	在单元矩阵中应用数据模式的方法	153
6.2.5	在字中应用位模式的方法	153
6.3	SER 数值模拟数据	153
6.3.1	硅半导体材料	154

6.3.2	硅半导体元素	154
6.3.3	总反应截面	155
6.3.4	非弹性反应截面	156
6.3.5	逆向两体反应截面	156
6.3.6	复合材料 LET 计算	157
6.4	虚拟复合模型	159
第 7 章	模拟结果及其意义	160
7.1	模型验证	160
7.1.1	核反应模型	160
7.1.2	加速器实验结果	160
7.1.3	野外实验结果	161
7.2	等比例缩小的影响	162
7.3	多位错误的非对称性	165
7.3.1	离散的和最邻近的 MCU	165
7.3.2	对结构敏感的 MBU	167
7.3.3	抑制 MBU 的空白插入技术	168
7.4	材料效应	168
7.4.1	不同材料的次级离子	168
7.4.2	虚拟复合材料器件的结果	169
7.5	SEU 激励方程的能量阈值	170
第 8 章	中子实验方法的国际标准	172
8.1	标准的发展现状	172
8.2	单能质子实验方法	172
8.3	(准)单能中子实验方法	173
8.4	散裂中子实验方法	174
第 9 章	总结和挑战	176
9.1	多位翻转的标准实验方法	176
9.2	中子在逻辑器件中引起的错误	176
9.3	对材料的深入研究	177
9.4	系统级的可能反馈	178
9.5	多种不同层次下的加固措施	179
9.5.1	工艺或器件级的加固措施	179
9.5.2	部件级的加固措施	180

9.5.3 系统级的加固措施	181
9.6 学科合作在未来研究中的必要性	182
附录	183
A.1 放射性防护量纲	183
A.2 总截面的近似函数	184
A.3 非弹性截面的近似方程	189
A.4 逆向反应截面 GEM 计算结果与文献数据的比较	193
A.5 硅器件衬底近似结果	195
A.6 硅器件中衬底 LET 计算系数	196
缩略语	199
参考文献	201

第 1 章 绪 论^①

本章首先介绍了大气层中子单粒子效应领域的研究历史和现状,以及存储器特别是静态随机存储器(SRAM)单粒子翻转的重要意义;其次讨论了单粒子效应的物理机理;最后介绍了本书的章节结构。

1.1 背景

多年来,研究人员对在宇宙射线或太阳耀斑等严酷的辐射环境中的电子器件,由质子或重离子引起的各种单粒子效应,进行了深入的研究^[1.1-1.5]。在航空电子学领域,研究人员还研究了由大气层中子诱导的单粒子效应^[1.6,1.7]。虽然在 20 世纪 70 年代末就指出,地面 α 射线和大气中子会导致单粒子效应,但是直到 90 年代大多研究和措施主要关注 α 射线在存储器中引起的单粒子翻转^[1.10]。20 世纪 90 年代初,自从大气中子被认为是造成单粒子翻转的潜在威胁源后,这个问题才引起了更多的关注^[1.11-1.16]。

表 1.1 列出了各种单粒子效应(软错误和硬错误)。从表 1.1 可以看出,逻辑^[1.17,1.18]和功率 MOSFET 器件^[1.19,1.20]也容易受到这些威胁的损伤。

表 1.1 大气层中子导致的错误模式

类别	模式	存储器
软错误 (单粒子翻转)	SBU	单位翻转
	MCU	在一个事件中多位翻转
	MBU	在同一个字、一次事件中的多位翻转(不能通过纠错代码纠正)
	Block error	源于外围电路错误导致的沿位线和字线的高位错误
	MCBI	由于沟道电流的快速反向触发寄生双极晶体管导通引起的高位翻转,通过重写可以纠正,有时与低电流有关
	FBE	绝缘体上硅(SOI)的主要错误模式。通过体结减弱
	SET	逻辑器件如锁相环、反相器和时钟的错误模式

① 本章作者 Eishi Ibe。

(续)

类别	模式		存储器
伪硬错误	SESB		S/D 沟道中的双极作用。电离效应可能影响
	PCSE	SEL	由于寄生结构大电流持续流过引起的。只有切断电源能够消除,但是有时会烧毁(硬错误)
		SEFI	逻辑器件的功耗循环软错误(PCSE)
		Firm Error	SRAM 型 FPGA 错误模式
硬错误	SEGR		由于高能重离子作用引起的薄氧化层烧毁。功率 MOSFET、Flash 存储器
	SEB		功率 MOSFET 烧毁错误

不论器件的类型和密度,单粒子翻转率的威胁水平最初定为 1000FIT/芯片 (1FIT = 10^9 小时内 1 次错误)^[1,21]。这个要求基本上相当于每 114 年 1 次错误,也相当于大型服务系统 1 个月出现 1 次错误。当 1000FIT/芯片的错误率在电影或者音乐等多媒体中发生时,显然是无关紧要的,但是在如自动推进和紧急救援系统等危急安全系统中发生,则是绝不能接受的。另外,在器件尺寸持续减小的条件下,保持 1000FIT/芯片的错误率水平变得非常困难。因此,错误率威胁水平按照错误模式和应用定义,列于表 1.2。例如,软错误率要求可以按照 FIT/Mb 代替 FIT/芯片。对于一些危急安全应用或错误模式,要求也许比 1FIT/系统还低。无论如何,对某一个特定器件的敏感性都很难用简单方法量化,这是因为对错误率的要求非常低。因此,基于加速器的实验方法和数值模拟技术,对于当前和未来的单粒子效应的机理澄清和量化是不可缺少的。在中子单粒子软错误评估系统 (SECIS)^[1.16,1.22-1.25] 框架下,已经研制出了(准)单能和散裂中子实验^[1.11]以及数值模拟软件宇宙射线效应模拟(CORIMS)的可靠解决方法。这些方法由原著作者开发,并在本书中加以介绍。

表 1.2 大气中子引起的错误率要求

类别	错误模式	可能的要求	备注
软错误	SEU 单粒子翻转	1000FIT/芯片	MTBF * ~100 年/芯片 <1 天/超级计算机
		200 ~ 400FIT/Mb 或者更高	能够通过纠错代码(ECC)纠正与应用有关
	MCU 不同单元多位翻转	单粒子翻转总数的 10% 或更高	只有在同一个字中的多位是致命的与应用有关
	SET 单粒子瞬态	测定	逻辑器件软错误
	MBU 多位翻转	0 ~ 10FIT/芯片	在同一个字中 MCU 可能引起系统崩溃

(续)

类别	错误模式	可能的要求	备注
伪硬错误	SEFI(单粒子功能中断)	0~1FIT/芯片或系统	逻辑系统错误可能通过重启修复
	SEL(单粒子门锁)	0~1FIT/芯片或系统	连续电流切断电源恢复
硬错误	SEL,SEB,SEGR	0~1FIT/芯片或系统	永久可以通过重新绘图定位
注:* MTBF——平均故障时间			

SRAM 器件的单粒子翻转和多位翻转是重点关注的问题,原因是随着器件尺寸的持续减小,SRAM 是最容易受到损伤的器件。图 1.1 给出了文献中收集的 SRAM 和 DRAM 数据发展趋势^[1.15]。SRAM 和 DRAM 的 SEU 截面(SEU 截面被定义为单位通量内的错误数,= 错误数量/粒子通量(n/cm^2))变化趋势完全不同:SRAM 会随着存储密度的增加而变得更加糟糕,而 DRAM 则会变得好一些。趋势的不同将在第 7 章借助于模拟进行详细分析。多位翻转(MBU,MCU 是相同的词)在实际应用中比 SEU 更为重要,因为 MBU 无法用标准的纠错代码(ECC)纠正,因此可能会造成大型服务器系统意外关闭,导致巨大损失^[1.13]。与 α 粒子不同,一般认为是核散裂反应的次级重离子引起 MBU^[1.23]。由于重离子射程相对较小(在硅中通常小于 $30\mu\text{m}$),而插值技术将同一字中的位用 $40\sim 50\mu\text{m}$ 的间隔分开,该技术常用于抑制 MBU。但是此类技术会使结构设计更加复杂,或者对性能(速度和功耗)造成负面影响。

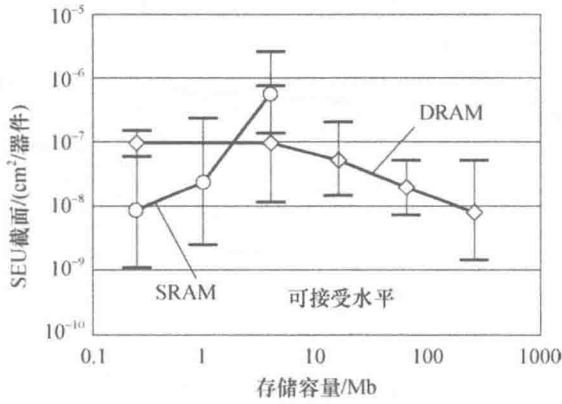


图 1.1 SRAM 和 DRAM 软错误易损性与存储器存储容量之间的关系

1.2 单粒子效应机制概述

宇宙射线(主要是质子)和宇宙原子核(氮和氧)之间的核散裂反应会造成核级联簇射,从而产生高能中子、质子、介子、 μ 介子和中微子,如图 1.2 所示^[1.26]。