

WILEY

集成电路辐射效应与加固技术



国防电子信息技术丛书

Terrestrial Radiation Effects in ULSI Devices
and Electronic Systems

现代集成电路和电子系统 的地球环境辐射效应

[日] Eishi H. Ibe 著

毕津顺 马 瑶 王天琦 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
集成电路辐射效应与加固技术

现代集成电路和电子系统 的地球环境辐射效应

Terrestrial Radiation Effects in ULSI
Devices and Electronic Systems

[日] Eishi H. Ibe 著

毕津顺 马 瑶 王天琦 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍广泛存在的各种辐射及其对电子设备和系统的影响,涵盖了造成 ULSI 器件出错和失效的多种辐射,包括电子、 α 射线、介子、 γ 射线、中子和重离子,从物理角度建模,以确定使用何种数学方法来分析辐射效应。本书对多种降低软错误影响的预测、检测、表征和缓解技术进行了分析和讨论。作者还展示了如何对在凝聚态物质中复杂的辐射效应进行建模,以量化和减少其影响,并解释了在环境辐射中包括服务器和路由器在内的电子系统是如何失效的。

本书的读者对象主要是航天电子、核与空间辐射、半导体物理和电子设备以及其他应用物理建模等领域的科研人员和研究生。对各种物理现象的建模和数值计算感兴趣的研究人员或学生也可参考本书。

Terrestrial Radiation Effects in ULSI Devices and Electronic Systems, 9781118479292, Eishi H. Ibe

© 2015 John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2015-7445

图书在版编目(CIP)数据

现代集成电路和电子系统的地球环境辐射效应/(日)伊部英治(Eishi H. Ibe)著;毕津顺等译.

北京:电子工业出版社,2019.1

(国防电子信息信息丛书)

书名原文:Terrestrial Radiation Effects in ULSI Devices and Electronic Systems

ISBN 978-7-121-35115-0

I. ①现… II. ①伊… ②毕… III. ①集成电路-全球环境-辐射效应 ②电子系统-全球环境-辐射效应 IV. ①TN4 ②TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 222118 号

策划编辑:杨 博

责任编辑:杨 博

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:14 字数:358 千字

版 次:2019 年 1 月第 1 版

印 次:2019 年 1 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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: yangbo2@phei.com.cn

Preface from author

When I have received the offer from Prof. Bi to translate my book published by Wiley and IEEE Press in English to Chinese, everyone in my Hitachi office (now I am the CEO of exaPalette, LLC), in Japan, was amazed at the news. That must be a really new stage in Asian scientific/engineering horizon!

I appreciate very much for the efforts by Prof. Bi, and Dr. Shi-Jie Wen with Cisco System Inc. who is among the most powerful leaders in the field of terrestrial radiation effects in electronic devices and components.

I have been very happy with Dr. Wen and other outstanding researchers in the world especially in the USA and Europe that I could have shared important outcome with them.

I am indeed hoping the new connection between Chinese and Japanese scientists and engineers would bring fruitful breakthroughs!

Eishi H. Ibe

Japan

原著作者写给中文版的序言

当我得知毕教授将我之前在 Wiley IEEE 出版社出版的英文专著翻译成中文时，我的日本日立的所有同事都感到非常的惊喜（我现在在 exaPalette 公司任 CEO）。这绝对是亚洲科学界和工程界新的阶段和里程碑！

我非常感谢毕教授和思科公司文世杰博士所付出的努力。思科公司是电子器件和部件的地球环境辐射效应领域的最有实力的引领者之一。

很高兴和文博士以及国际上特别是欧美国家的其他杰出学者一道努力，共享重要的成果产出。

我非常希望中日科学家和工程师之间新的连接纽带能够带来富有成果的突破！

Eishi H. Ibe

日本

译者序

感受不到，并不代表不存在。地球辐射环境中的中子和其他带电粒子对现代集成电路可靠性的影响越来越严重。它们在器件/电路中引入故障或错误，进而导致电子系统失效。当我们进入后摩尔时代，讨论 More Moore、More than Moore 和 Beyond CMOS 发展技术路线时，我们也应该清楚地认识到节点存储电荷减少、电荷共享、多位翻转、单粒子瞬态和串扰耦合等问题的严重性。对于民用电子元器件而言，需要在考虑可靠性和成本以及性能之间进行折中优化，而不能采用像军用和宇航级产品那样几乎不计成本的加固方案。如何准确理解地球辐射环境？该环境如何作用于集成电路？如何有效地进行辐射效应评估？如何建立模型？如何对不同层级进行加固优化？如何设立标准和规范？如何面对未来集成电路技术发展的挑战？针对这一系列问题，*Terrestrial Radiation Effects in ULSI Devices and Electronic Systems* 一书给出了明确的答案。这需要天文学、宇宙射线物理、核物理、加速器物理、半导体物理、电路理论、计算机理论、数值仿真、EDA（电子设计自动化）工具、编码理论、可靠性物理和数据库管理等多学科交叉与协同努力。

原著作者 Eishi H. Ibe 博士曾是日本日立公司（Hitachi）的首席研究员、IEEE 会士，单粒子效应和软错误研究领域的国际权威。2017 年 5 月，本人非常有幸和 Ibe 博士在成都相见。Ibe 博士温文尔雅，学识渊博，给我留下了非常深刻的印象。在得知我在翻译他的著作时，Ibe 博士给了我很多的鼓励和支持，让我非常感动。

在开始翻译本书的时候，我的儿子刚刚出生。如今图书出版，他也成长为满地乱跑的淘气小孩。感谢我的孩子，感谢我的爱人，更要感谢我的父母。他们的支持，是我前进的动力。此书也是我献给他们的礼物。

本书的第 5 章和第 6 章分别由四川大学马瑶博士和哈尔滨工业大学王天琦博士翻译。对他们的辛勤付出以及领导和同事的支持，一并表示感谢。

由于译者水平所限，译本中错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

毕津顺
于北京

前言^①

在日常生活中，我们意识不到地球环境辐射的存在——宇宙射线和地表放射性同位素辐射产生次级粒子。地球环境辐射非常弱（低注量率），以至于对人体器官有无法观测的影响，但对地表电子系统中的 LSI、VLSI 和 ULSI 器件有可观测的影响。

1974 年，我还是京都大学大四学生，主要研究如何测量地球环境 μ 介子的寿命。那时没有人（包括我本人）知道或想到，来自地球环境中子的影响。

半导体工业的快速发展，使我们认识到了地球环境辐射对半导体器件的影响。首先，放射性同位素玷污释放 α 射线，在 DRAM（动态随机存取存储器）和 SRAM（静态随机存取存储器）器件中引起软错误。读者将在本书中看到，由于诸多原因，直到 20 世纪 90 年代晚期，人们才认识到地球环境中子软错误。随着器件特征尺寸等比例缩小到 100 nm 以下，地球环境辐射的影响面和深度都大为增加。科学探索的焦点不仅聚集在地球环境中子，还包括质子和 μ 介子等地球环境辐射粒子。除了存储器，人们还研究时序/组合逻辑器件和电路。人们之前主要关注服务器/路由器失效，目前也拓展到了机动车工业领域。

人们广泛认识到，地球环境辐射在器件/电路中引入故障或错误，从而导致电子系统失效，而要想降低失效，就需要采用两种或多种减缓技术组合或协同，例如衬底、单元、电路、CPU（中央处理器）、中间件、OS（操作系统）和应用。这是一项极具挑战性的任务，涵盖多个学科，包括天文学、宇宙射线物理、核物理、加速器物理、半导体物理、电路理论、计算机理论、数值仿真、EDA（电子设计自动化）工具、编码理论、可靠性物理和数据库管理，等等。

同时，这项工作也是非常有趣和吸引人的。我本人在该领域开展研究期间，学习到了关于地球的很多有趣和令人兴奋的知识。

地球上方的大气层仅有 50 km 厚，约为地球半径的 1/250，如果没有它，我们就无法生存。由于暴露在宇宙射线下存在辐射极限，宇航员在内层/外层太空中停留的时间是有限的。没有大气层，我们人类就无法在地球上生存。地球外部薄薄的大气层，保护我们免受外太空恶劣宇宙辐射的影响。

美丽的南北极光就是宇宙射线与大气层相互作用的结果。

用于放射性碳年代测定的 ^{14}C ，就是由 ^{14}N 与宇宙射线质子在大气层中核反应产生的。根据 CERN 团队最近的报道，天上的云朵也很可能由宇宙射线所引发。

作者希望本书能够激发起读者的兴趣，关注宇宙射线对地球和我们日常生活的影响。

① 中译本的一些图标、参考文献、符号及其正斜体形式等沿用了英文原著的表示方式，特此说明。

作者简介

Eishi Hidefumi Ibe 博士，曾任日本日立公司首席研究员，1975 年获得日本京都大学物理学士学位，1985 年获得大阪大学核工程博士学位。

他在 1975 年进入日立公司原子能研究实验室工作，2006 年升任日立公司横滨研究实验室（前身为生产工程研究实验室）首席研究员。

在其职业生涯的前 20 年中，他在核工程领域做出了大量卓有成效的工作，特别是关于水（辐解）和组件材料的辐射效应。在随后的 18 年中，他着重研究半导体器件单粒子效应。他的学术专长跨越多个学科，例如基本粒子/宇宙射线物理、核/中子物理、半导体物理、数学和计算技术、离子注入/混合和加速器技术、电化学、数据库管理、RBS（卢瑟福背散射谱）/俄歇/SEM（扫描电镜）/激光束微分析，等等。

针对核电站冷却液中的水辐解仿真技术，他开展了很多开创性的工作，揭示核心区的水冷却液分解为 H_2 和 H_2O_2 。他还针对抑制 H_2O_2 氧化的氨水化学技术建立了理论基础，如今广泛应用于日本的沸水反应堆，减缓组件材料晶粒间应力侵蚀破裂。他于 1986 年和 1990 年获得日本原子能协会的奖励，于 1996 年获得美国核学会的奖励。

在过去的 18 年中，针对地球环境电子元器件中子软错误，他致力于开发验证技术和减缓技术。他研发了 CMOS（互补金属氧化物半导体）器件新型软错误模型。这些模型被用于设计更可靠的半导体存储器件和逻辑门电路，获得地球环境中子软错误的突破性知识。在他的领导下，研发了新的实验技术，用于验证电子元器件软错误敏感度，并且这些技术成为了国际标准。

在中子故障/错误/失效领域，他是众多 IEEE 期刊和会议的委员或审稿人，其中期刊包括 EDS 和 TNS，会议包括 IRPS、IOLTS、ICICDT、WDSN、NSREC、RADECS、RASEDA、ICITA 和 SELSE。他在国际上在辐射效应领域发表了 90 余篇技术论文和报告，其中有 25 篇特邀稿件/报告。根据期刊和会议主席的要求，他审阅了 200 余篇技术论文。这种积累使得他在单粒子效应领域具有既深且宽的视野。

由于其对存储器件软错误分析方面的贡献，Ibe 博士于 2008 年成为 IEEE 会士。可以通过他在 World Scientific 出版社（2008 年）和 Springer 出版社（2010 年和 2011 年）出版的图书，查阅他的一些学术成果。

致 谢

我非常感谢 Emeritus T. Nakamura 教授、M. Baba 教授和 Y. Sakemi 教授，与他们的讨论帮助了我，他们还在核反应数据库以及日本东北大学 CYRIC 高能中子实验方面提供了支持。我还要感谢 Alexander Prokofiev 教授，他在瑞典乌普萨拉大学 TSL 高能中子实验中提供了热情的帮助。我还与 C. Slayman 博士、思科公司的文世杰、Intel 公司的 N. Seifert、TI 公司的 R. Baumann、TIMA 实验室的 M. Nicolaidis、iRoc 公司的 D. Alexandrescu 和 A. Evans、富士实验室的 T. Uemura 和 SONY 公司的 H. Kobayashi 进行了交流与讨论，在此一并表示感谢。我还要感谢日本京都技术研究所的 K. Kobayashi 教授、日本京都大学的 H. Onodera 及日本九州大学的 M. Yoshimura 博士和 Y. Matsunaga 博士，在 SEU 容错触发器和 EDA 工具方面，他们提供了很多有价值的信息。日本宇航局（JAXA）的 Kuboyama 博士和 D. Kobayashi 博士、日本大学的 Y. Takahashi 教授和 HIREC 的 A. Makihara 女士也与我进行了有意义的讨论和交流。

目 录

第1章 简介	1
1.1 地球环境次级粒子的基本知识	1
1.2 CMOS 半导体器件和系统	3
1.3 两种主要的故障模式：电荷收集与双极放大	6
1.4 电子系统中故障条件下的四种架构：故障-错误-危害-失效	9
1.5 软错误研究的历史背景	10
1.6 本书的一般范围	13
参考文献	13
第2章 地球环境辐射场	17
2.1 一般性辐射来源	17
2.2 选择地球环境高能粒子的背景知识	17
2.3 航空高度的粒子能谱	19
2.4 地球环境的放射性同位素	22
2.5 本章小结	24
参考文献	24
第3章 辐射效应基础	26
3.1 辐射效应介绍	26
3.2 截面定义	28
3.3 光子引起的辐射效应 (γ 和 X 射线)	28
3.4 电子引起的辐射效应 (β 射线)	30
3.5 μ 介子引起的辐射效应	31
3.6 质子引起的辐射效应	32
3.7 α 粒子引起的辐射效应	34
3.8 低能中子引起的辐射效应	34
3.9 高能中子引起的辐射效应	35
3.10 重离子引起的辐射效应	36
3.11 本章小结	37
参考文献	37
第4章 电子器件和系统基础	39
4.1 电子元器件基础	39
4.1.1 DRAM (动态随机存取存储器)	39
4.1.2 CMOS 反相器	39

4.1.3	SRAM (静态随机存取存储器)	40
4.1.4	浮栅存储器 (闪存)	41
4.1.5	时序逻辑器件	42
4.1.6	组合逻辑器件	43
4.2	电子系统基础	43
4.2.1	FPGA (现场可编程门阵列)	43
4.2.2	处理器	44
4.3	本章小结	46
	参考文献	47
第5章	单粒子效应辐照测试方法	48
5.1	场测试	48
5.2	α 射线 SEE 测试	50
5.3	重离子辐照测试	52
5.4	质子束测试	56
5.5	高能 μ 介子测试方法	60
5.6	热/冷中子测试方法	63
5.7	高能中子测试	65
5.7.1	使用放射性同位素的中能中子源	65
5.7.2	单色的中子测试	66
5.7.3	类似单色的中子测试	68
5.7.4	散裂中子测试	73
5.7.5	中子能量和通量的衰减	74
5.8	测试条件以及注意事项	76
5.8.1	存储器	76
5.8.2	电路	76
5.9	本章小结	78
	参考文献	78
第6章	集成器件级仿真技术	87
6.1	多尺度多物理软错误分析系统概述	87
6.2	相对二次碰撞和核反应模型	91
6.2.1	一个粒子能量谱的能量刻度设置	91
6.2.2	相对次级碰撞模型	92
6.2.3	ALS (绝对实验系统) 和 ALLS (联合实验系统)	93
6.3	高能中子和质子的核内级联 (INC) 模型	96
6.3.1	核子与靶向核子的穿透过程	97
6.3.2	靶核中两个核之间二次碰撞概率的计算	98
6.3.3	核子-核子碰撞条件的确定	98
6.4	高能中子和质子蒸发模型	99

6.5	用于逆反应截面的广义蒸发模型 (GEM)	101
6.6	中子俘获反应模型	103
6.7	自动器件建模	104
6.8	设置部件内部核裂变反应点的随机位置	106
6.9	离子追踪算法	107
6.10	错误模式模型	110
6.11	翻转截面的计算	114
6.12	在 SRAM 的 22 nm 设计规则下软错误的缩放效应预测	115
6.13	半导体器件中重元素核裂变效应影响的评估	116
6.14	故障上限仿真模型	117
6.15	故障上限仿真结果	119
6.15.1	电子	119
6.15.2	μ 介子	120
6.15.3	质子的直接电离	120
6.15.4	质子裂变	120
6.15.5	低能中子	121
6.15.6	高能中子裂变	122
6.15.7	次级宇宙射线的对照	123
6.16	SOC 的上限仿真方法	123
6.17	本章小结	124
	参考文献	125
第 7 章	故障、错误和失效的预测、检测与分类技术	126
7.1	现场故障概述	126
7.2	预测和评估 SEE 引起的故障条件	127
7.2.1	衬底/阱/器件级	128
7.2.2	电路级	129
7.2.3	芯片/处理器级	130
7.2.4	PCB 板级	132
7.2.5	操作系统级	132
7.2.6	应用级	133
7.3	原位检测 SEE 引起的故障条件	134
7.3.1	衬底/阱级	134
7.3.2	器件级	135
7.3.3	电路级	135
7.3.4	芯片/处理器级	136
7.3.5	PCB 板/操作系统/应用级	138
7.4	故障条件分类	138
7.4.1	故障分类	138

7.4.2	时域中的错误分类	139
7.4.3	拓扑空间域中的存储器 MCU 分类技术	140
7.4.4	时序逻辑器件中的错误分类	145
7.4.5	失效分类: 芯片/板级的部分/全部辐照测试	145
7.5	每种架构中的故障模式	145
7.5.1	故障模式	145
7.5.2	错误模式	147
7.5.3	失效模式	149
7.6	本章小结	154
	参考文献	154
第 8 章	电子元件和系统的故障减缓技术	164
8.1	传统的基于叠层的减缓技术及其局限性与优化	164
8.1.1	衬底/器件级	164
8.1.2	电路/芯片/处理器层	167
8.1.3	多核处理器	176
8.1.4	PCB 板/操作系统/应用级	177
8.1.5	实时系统: 机动车与航空电子	179
8.1.6	局限性与优化	180
8.2	超减缓技术面临的挑战	181
8.2.1	软硬件协同工作	181
8.2.2	SEE 响应波动下的失效减缓	181
8.2.3	跨层可靠性 (CLR)/层间内建可靠性 (LABIR)	183
8.2.4	症状驱动的系统容错技术	184
8.2.5	比较针对系统失效的减缓策略	185
8.2.6	近期挑战	186
8.3	本章小结	187
	参考文献	188
第 9 章	总结	197
9.1	总结甚大规模集成器件和电子系统的地球环境辐射效应	197
9.2	将来的方向与挑战	197
	附录	199
	英文缩略语对照表	205

第 1 章 简 介

1.1 地球环境次级粒子的基本知识

宇宙射线具有极高的能量，来自于银河系中心和太阳，到达地球大气层。外太空初级宇宙射线主要由质子构成（约占 90%）。因为宇宙射线是带电粒子，所以沿地磁线或日磁力盘绕，如图 1.1 所示。一些带电粒子被地磁力俘获，从而形成范艾伦辐射带。如果宇宙射线能量小于地磁截止刚度，则在进入地磁场之前就会被偏转。另一方面，一些带电粒子沿磁力线被吸引至地磁两极，有时伴随着南北极光。因为赤道附近的地磁力线平行于地表，所以宇宙射线在该处发生强烈偏转。综上所述，到达大气层的宇宙射线的强度是不同的，具体取决于地球的地磁维度。

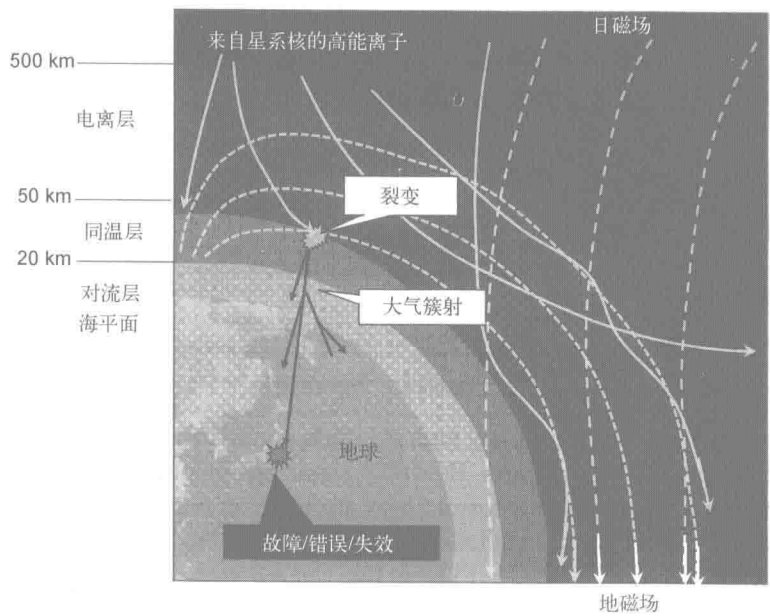


图 1.1 地球环境辐照引起单粒子效应的整体示意图

当高能质子进入地球大气层（对流层和同温层）后，一些质子与大气层中的原子核（主要是氮和氢的原子核）发生核裂变反应，产生大量轻粒子，包括中微子、光子、电子、 μ 介子、 π 介子、质子和中子，如图 1.2 所示。与质子相比，次级中子在大气中的射程更长，因此在大气中引发级联裂变反应，可以产生到达地球表面的大气簇射（air show-

er)。基于美国不同位置的测量数据，图 1.3 给出了纽约市海平面附近估算的微分中子谱^[1]。地表附近的中子能量范围大于 1 GeV，能量大于 1 MeV 的中子平均注量率为 20 n/cm²/h。空气可以屏蔽中子，所以中子的强度（注量率和能量）取决于高度，也与大气压有些关系^[2]。与地表中子注量率相比，飞行高度的中子注量率高出两个数量级。

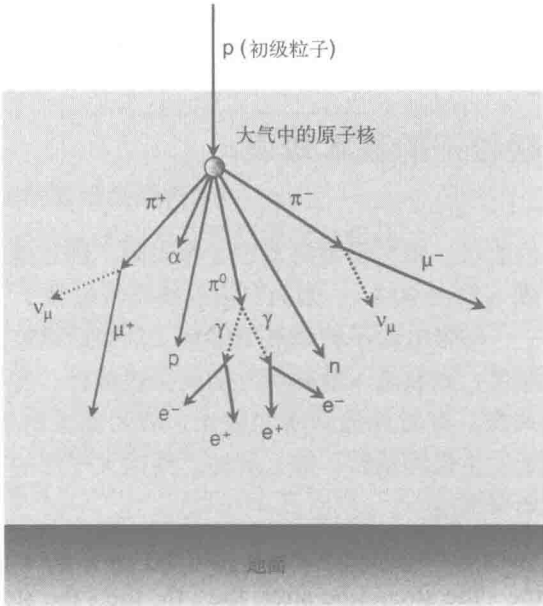


图 1.2 次级粒子生成的初级阶段

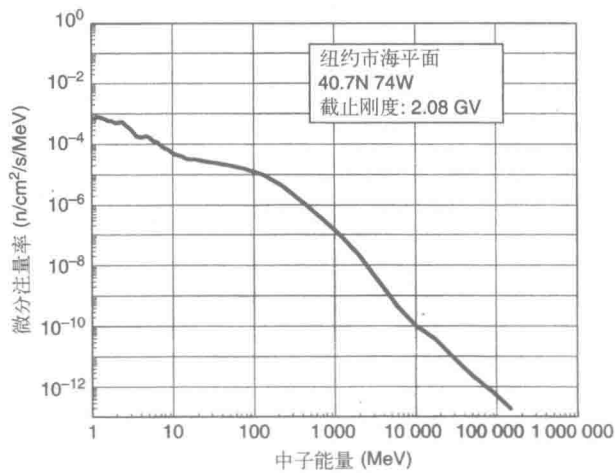


图 1.3 基于 JESD89A 标准，在纽约市海平面附近的微分高能中子谱

此外，宇宙射线还受到日磁场或太阳活动周期的影响（约 11 年一个循环），所以地表附近的中子强度也具有约 11 年的周期性，如图 1.4 所示^[3]。在太阳活动最大期，地表附近中子注量率最低；在太阳活动最小期，中子注量率最高。在正常活动期，太阳释放大量的质子，但是与太阳活动最大期^[4]相比，此时质子的能量相对较低，如图 1.5 所示。

这是因为来自太阳的质子不会在地表附近直接引起大气簇射。然而，当太阳表面发生大耀斑时，更多的高能质子被抛射出来，其能量可与银河质子相比较，如图 1.5 所示^[5]，并可以引起大气簇射。

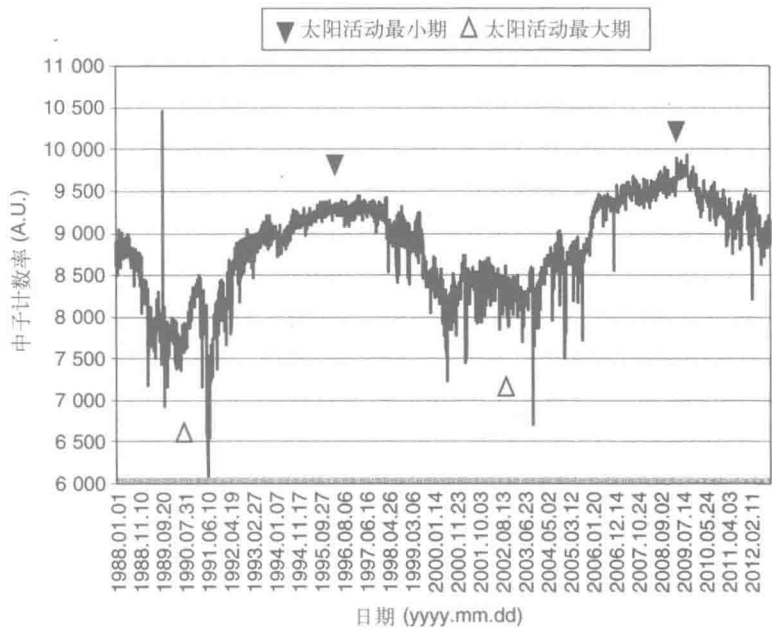


图 1.4 莫斯科中子监控中心测量的中子注量率的长期周期性变化

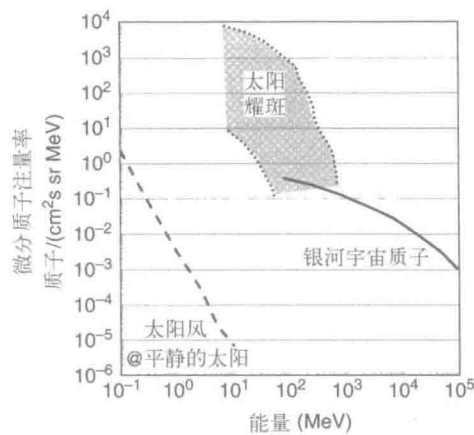


图 1.5 来自太阳活动最小期、太阳大耀斑和银河中心的微分质子谱

1.2 CMOS 半导体器件和系统

CMOS（互补金属氧化物半导体）器件，例如静态随机存取存储器（SRAM）或触发器

(FF)，位于 n 阱和 p 阱的条状结构中。例如，图 1.6 给出了条状结构中一位 SRAM 和或门单元的典型扩散层版图（节点）。至于绝缘体上硅（SOI），氧化物埋层（BOX）位于阱的下方，如图 1.7 所示。隔离氧化物通常是浅沟道隔离（STI）氧化物，用于在水平方向上隔离各个节点。当 SOI 层厚度小于沟道区耗尽层深度时，该结构为 FDSOI（全耗尽 SOI）。如果 SOI 层厚度大于沟道区耗尽层深度，则该结构为 PDSOI（部分耗尽 SOI）。因为在 FD-SOI 结构中 BOX 上表面完全被耗尽层所覆盖，因此与体硅/PDSOI 相比，寄生电容大为减少，从而亚阈值特性更陡，延迟和功耗均降低。

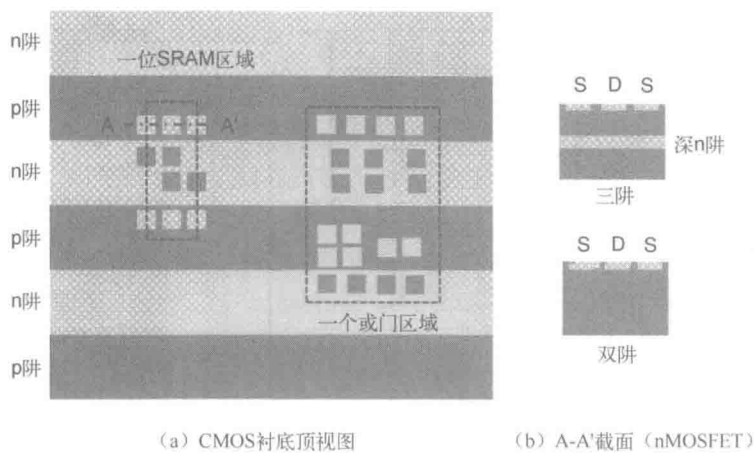


图 1.6 n 阱和 p 阱条状结构中 CMOSFET 器件的基本版图，以及双阱和三阱的截面

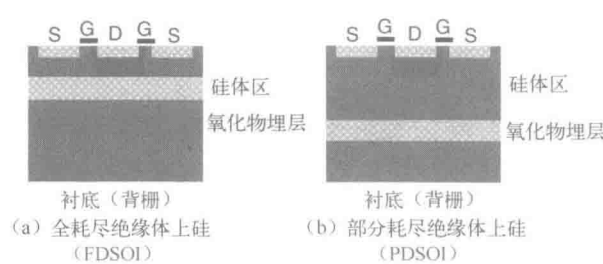


图 1.7 SOI 器件结构（图像）

Sugii 等人开发出薄绝缘体上硅（SOTB），可以在薄 BOX（厚度约 10 nm）底部的硅层施加背栅偏置，从而控制阈值电压 V_{th} [6]。该结构称为双栅结构，起源于 FinFET [7]。

在阱结构上方，通过金属线将一些节点电学连接起来，从而形成电路。图 1.8 给出了 SRAM 的典型电路。图 1.8 (a) 示意了 SRAM 的简化描述，即两个反相器形成的环路。当两个节点的数据相反时，电路是稳定的，所以可以存储数据。具体来说，如图 1.8 (b) 所示，两个节点 Q 和 $\bar{Q}$ 存的数据分别为“1”（高压/ V_{cc} ）和“0”（低压/ V_{ss} ）。当 Tr_5 和 Tr_6 传输晶体管开启时，节点的数据被读取或写入。当 n_1/n_2 状态为高时，pMOSFET（p 沟金属氧化物半导体场效应晶体管）晶体管 Tr_4 关断，nMOSFET（n 沟金属氧化物半导体场效应晶体管）晶体管 Tr_3 开启，从而使得 n_3/n_4 状态为低。这使得 pMOSFET 晶体管 Tr_2 开启，nMOSFET 晶体管 Tr_1 关闭，最终 n_1 – n_4 的状态保持稳定。图 1.8 (c) 给出了节点 n_1 – n_{10} 源漏区对应的版图示例。

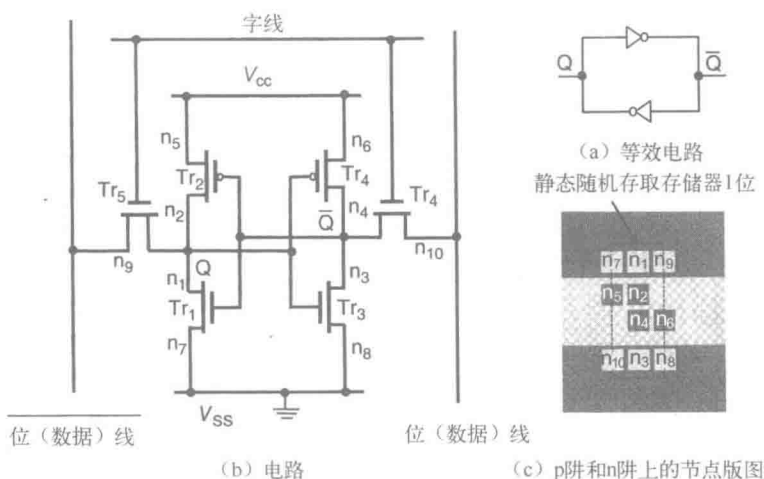


图 1.8 SRAM 功能和版图

逻辑电路由组合逻辑门（与门、或门、与非门、或非门等）和时序逻辑电路构成。图 1.9 给出了一个典型的触发器电路。在同步逻辑电路中，全部操作由时钟信号来控制，而时钟信号通常由锁相环（PLL）电路产生。通过控制两个相邻触发器间门电路的输入，可以在一个时钟周期内执行 CPU 的一条指令。当后续时钟到达每个触发器的时钟输入端时，每个触发器都会捕获执行结果。

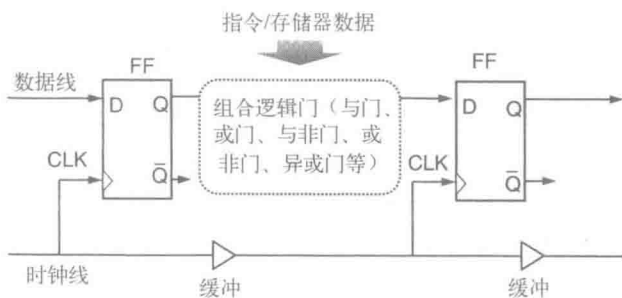


图 1.9 触发器逻辑电路示例

图 1.10 给出了电子系统典型架构示意图，包括电源和印制电路板（PCB），以及各种芯片，如 CPU/GPU（图形处理器）、RAM、ROM（只读存储器）、FPGA（现场可编程门阵列）、PLL、DSP（数字信号处理器）和 I/O（输入/输出）端口；此外还有系统，例如服务器、路由器、汽车、火车和飞机等。系统中的传感器用于监控系统状态，而执行器和马达用于控制系统运行。

电子系统作为一个整体，包含了很多层级，如图 1.11 所示，从最底层级的阱/衬底直到最高层级的最终硬件产品应用。