

微电子与集成电路技术丛书

国家集成电路人才培养基地专家指导委员会组编



韩郑生 编著

Han Zhengsheng

赵元富 主审

Zhao Yuanfu

清华大学出版社



微电子与集成电路技术丛书

国家集成电路人才培养基地专家指导委员会组编

Introduction to Radiation Hardened Integrated Circuit

抗辐射集成电路概论

清华大学出版社
北京

《微电子与集成电路技术丛书》

编审委员会

顾问

丁文武(国家工业和信息化部)
叶甜春(中国科学院)
冯记春(国家科技部)
邬江兴(解放军信息工程大学)
严晓浪(浙江大学)
张尧学(教育部)
郝跃(西安电子科技大学)
潘建岳(新思科技)

王阳元(北京大学)
包为民(中国航天科技集团公司)
吴德馨(中国科学院)
许居衍(华晶集团)
李志坚(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)
侯朝焕(中国科学院)
魏少军(清华大学)

主任

王志华(清华大学)

副主任

张兴(北京大学)
洪先龙(清华大学)
董在望(清华大学)

陈弘毅(清华大学)
姚素英(天津大学)

审稿委员

张建人(清华大学)
张大成(北京大学)
闵应骅(中国科学院)
徐秋霞(中国科学院)
赵元富(航天 772 研究所)
李斌桥(天津大学)

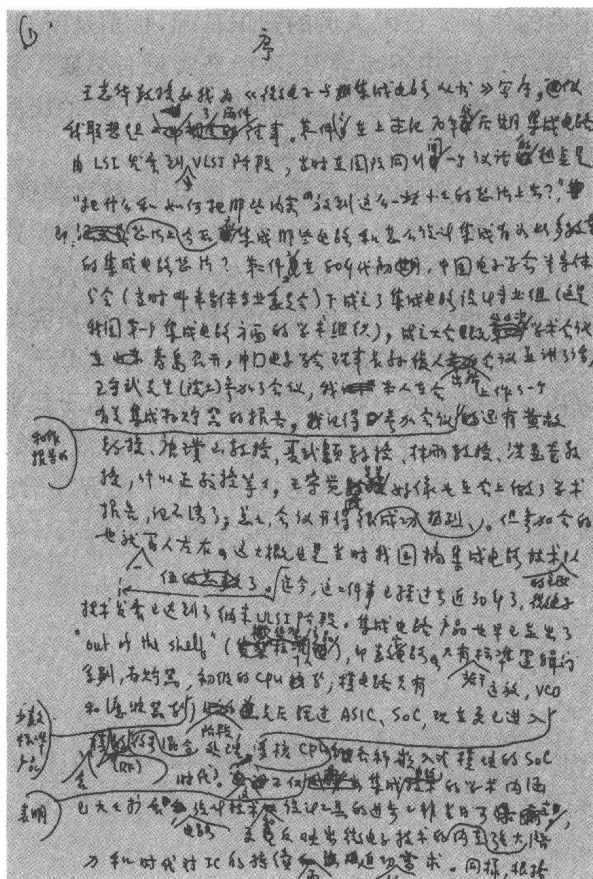
边计年(清华大学)
高明伦(南京大学)
刘章发(北京交通大学)
陈贵灿(西安交通大学)
吉利久(北京大学)
曾晓洋(复旦大学)

丛书秘书

朱秋玲(清华大学)

王志华教授要我为《微电子与集成电路技术丛书》写序,使我联想起了两件往事。第一件:上世纪70年代后期,集成电路由LSI发展到VLSI阶段,当时在国际同行间一个讨论的热点是:“把什么内容和如何把这些内容放到这么一块小小的芯片上去?”即今后芯片上应集成哪些电路和怎么设计集成有如此多电路的芯片?第二件:在上世纪80年代初,中国电子学会半导体分会(当时叫半导体专业委员会)下成立了集成电路设计专业组(这是我国第一个集成电路方面的学术组织),成立大会暨第一次学术会议在青岛召开,中国电子学会理事长孙俊人出席会议并讲了话,王守武先生(院士)参加了会议,我本人在会上作了一个有关集成存储器的报告,参加会议和作报告的还有黄敞教授、唐璞山教授、夏武颖教授、林雨教授、洪先龙教授、叶以正教授等等,记得王守觉先生也在会上作了学术报告。总之,会议开得很热烈、很成功。但参加会议的也就一百人左右,这大概也是当时我国搞集成电路技术的主要队伍。

迄今,这两件事已经过去近30年了,微电子技术已发展到了纳米ULSI阶段,集成电路产品也早已走出了out of the shelf的阶段,即数字电路只有若干标准逻辑门系列、存储器、初级的CPU等,模拟电路只有运放、VCO和滤波器等少数标准产品的阶段,先后经过ASIC、SOC,现今已进入了多核CPU、含射频、模拟与混合信号处理和各种嵌入式模块的SOC时代了。这不仅表明集成电路技术的学术内涵已大大扩展,电路设计技术和设计工具的进步已非当日可比,更反映出微电子技术的强大内在潜力和时代对IC的持续而迫切的需求。同样,根据中国半导体行业协会企业名册,我国有规模的IC设计企业已达到一百几十家,由此估计从业人员应该以万计算了,技术上我们已能独立设计出诸如3G手机核心芯片、嵌入式和高性能的CPU以及高档的保密芯片等产品,这表明我国的集成电路设计产业

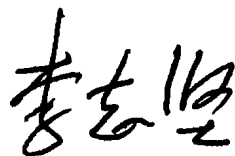


(李志坚院士为本丛书写序言手稿)

和技术队伍也有了相应的很大进步。

微电子和集成电路是现代信息技术发展的基石,集成电路产业关系到国家的经济命脉、人民生活品质和国防与国家安全。作为现代主要高科技之一,集成电路技术方面的国际竞争十分激烈:谁的产品功能强、质量优、推出早、成本低,谁就占领主要市场,为胜者;谁落后一步,往往会被无情淘汰。夸大一些说,这一竞争往往是“只有第一,没有第二”。微电子和集成电路技术要求的基础知识十分广博,又与众多的高新技术相互交叉。集成电路产品更新换代极其迅速,产品从研制到投产周期日益缩短。这一切都决定了从业人员必须要有极高的业务素质,其中技术人员的基础知识、专业水平,特别是技术团队的创新能力更有决定性的作用。技术人员的基础知识,特别是新知识的补充,越来越重要;不仅在学校学习很重要,在工作中不断学习、不断充实更有必要。我想,国家集成电路人才培养基地专家委员会支持这套“微电子与集成电路技术丛书”的出版,除了要达到提高在校学生专业课程教学质量的目的外,更有这方面的深层意义。

丛书各分册的内容涵盖了微电子、数字和模拟集成电路的基本原理和技术知识,还包括了 RF 和数模混合信号处理、嵌入式和高性能处理器、低功耗芯片设计、SoC 设计方法学、EDA 工具及应用等广泛的现代专门课题内容。选题广阔、全面,符合与时俱进的精神。本丛书由清华大学王志华教授领衔的编审委员会组织编写,各册编写者主要是工作在第一线具有一定教学和实际工作经验的年轻学术骨干,同时聘请了一批国内同行中的资深专家为审稿人严格把关。我相信在这样老、中、青三代业内人士的共同努力下,本丛书的内容和质量是有保证的,它的出版一定会对我国集成电路人才培养和现有科技人员素质的提升起到促进作用。我更希望本丛书的编审一定要十分重视学术上的严谨性,并期盼,经过不断完善,至少有部分分册今后能成为教学的精品。



2010 年 1 月 10 日

序二

我曾经说过,每当我拿起笔为年轻学者出版一套丛书或一本书写序的时候,心中总是怀有特别的喜悦,因为这意味着辛勤耕耘后的丰硕收获,也意味着年轻的学者在进步与发展的道路上又迈出了新的一步,所以我总是乐意而为之。

自1958年TI公司的Jack S. Kilby和1959年仙童公司的Robert Noyce发明集成电路和硅平面集成电路以来,50年间,微电子和集成电路技术可谓发展神速,如同摩尔规律(Moore Law)所描述与预期的那样,按存储器算,集成度每18个月翻一番;就微处理器而言,集成度每两年翻一番;相应特征尺寸则缩小为上一技术节点的0.7。当前集成电路的集成度已从发明时的12个元件(2个晶体管、2个电容和8个电阻)发展到今天的数十亿个元件。集成电路功能日新月异,而成本迅速降低,微处理器上晶体管的价格每年平均下降约26%。2006年,Intel曾发表了一个很有意味的广告词:“现在一个晶体管的价格大约与报纸上一个印刷字母的价格相当”。这就是说,人们只要买得起报纸,就消费得起集成电路。正因为如此,集成电路已广泛渗透到国民经济、国家建设和人民生活的各个领域,其应用的深度和广度远远超过了其他技术,是当代信息社会发展的基石。信息是人类社会三大资源之一,而且是目前利用得最不充分的资源。信息的本质是物质运动过程中的特征,信息技术包括信息的获取、传输、处理、存储、显示和随动执行等一系列的环节,而集成电路从狭义上讲则集信息处理、传输、存储等于一个小小的芯片中;从广义上讲,集成系统芯片(System on Chip, SoC)则集成了上述诸方面功能于一个芯片上或一个封装内的若干芯片(SiP)中,而这种可靠性高、功耗低的芯片又可以大批量、低成本地生产出来,因而势必大大地提高人们处理信息和应用信息的能力,大大地提高社会信息化的程度。它已如同细胞组成人体一样,成为现代工农业、国防装备和家庭耐用消费品不可分割的组成部分。集成电路科学技术的水平和它的产业规模也就理所当然地成为衡量一个国家或地区综合实力的重要标志之一,成为一个具有战略性的基础产业和高新科学技术领域。在过去的50年,在人类科学技术发展的沧海横流中,集成电路已经并正在不断显示其英雄本色。在人类社会步入信息化时代后,特别是在我国走“工业化带动信息化、信息化促进工业化”的具有中国特色的新型工业化道路中,在市场需求和国家中长期科学规划重大专项投入的双重促进下,我国集成电路科技和产业必将得到更多的发展机遇,带来更多的创新。

现代社会的科技竞争,包括微电子与集成电路技术的竞争,归根到底是人才的竞争。得人才者得天下,集人心者集大成,希望在人才。培育人才最重要的工作在于教育,只要人类社会存在,教育就是永恒的主题;只要人的生命存在,学习就是不竭的任务。不管是学校教育还是在实践基础上的自学进修都需要教材或称之为教本,所谓“教本、教本,乃教学之本”。

集成电路不是直接与消费者见面的最终产品,因而系统应用是使集成电路产生巨大增值的关键环节,而设计是微电子技术和集成电路产业链中最接近应用、也就是最接近市场的

领域,具有巨大的创新与市场空间。50年来集成电路的发展史是需求牵引和科学发现、技术发明推动相结合的历史,是一部技术创新和机制创新的历史。需求牵引往往由市场和系统应用提出,而设计首先就需要面对这种新的需求。一个好的算法、标准和设计往往可以引领市场的发展,为微电子和集成电路开拓一个崭新的领域。因此,“微电子与集成电路技术丛书”首批启动就将重点放在与设计相关的专业课程是十分恰当的。

《微电子与集成电路技术丛书》由国家集成电路人才培养基地专家委员会主持编写,第一批启动16册,第二批将再启动10余册,其内容涵盖了微电子及集成电路领域的主要范畴,尤以设计为主体。由年轻的学科带头人、清华大学王志华教授领衔丛书编审委员会,参加编写的有30多位年轻的学科带头人和学术骨干,这反映了我国年轻一代学者正在茁壮成长。同时,丛书还邀请了一批治学严谨的年长一代科学家和学者担任审稿工作,在这些学者的名单中我看到了在上世纪80年代就曾共事过的如洪先龙教授、吉利久教授、张建人教授等老朋友。我坚信:由年轻学者执笔,由年长一代科学家把关,丛书学术内容的新颖性和严谨性就一定能得到可靠的保证。

这套丛书特别适合于微电子与集成电路专业高年级本科生、研究生阅读,也适合相关领域的工程技术人员作为参考书。我相信,阅读本丛书的学生和科技人员必将受益匪浅。



2010年1月5日于北京大学

序三

有一个古老的中国寓言,说的是一个年轻的读书人看到一位仙翁用手指点一下石头,石头就能变成金砖,这是成语“点石成金”的来源。多年后的今天,人们常常只关注到那腐朽化神奇的“一点”而忘了故事寓意中最重要的一环,即练得此法术的方法和为此所需要付出的数十年的功德和修为。自1995年我从业以来,就一直惊叹微电子及集成电路是一个多么像“点石成金”的行业,而同时又是一个多么讲究方法、多么需要付出艰苦努力的领域!

多年来我和我在 Synopsys 公司的同事们一起在国内推广基于逻辑综合的自顶向下的集成电路设计方法,经历了逆向设计解剖版图的初始阶段,那时全国设计业产值不过上亿元人民币、设计企业不过数十家、从业人员以百十计,而现在,中国大陆已是全球最大的集成电路市场、全国设计业产值超过300亿(依然是方兴未艾)、设计企业超过500家、从业人员数以万计;从那时开设集成电路设计课程并装备集成电路设计工具环境的寥寥几所高校,到目前19所院校建有集成电路工程特色专业、20个(含在建)集成电路人才培养基地、约40个大学招收集成电路工程硕士、近50个大学(所、系)配置了我公司的IC设计工具的大学计划包。这真是个天翻地覆的变化。IC设计是个智力密集型、创新密集型的行业。没有高素质、实践型的人才和人才培养支撑体系,就没有持续发展的可能。人才依然是我们发展过程中遇到的最大瓶颈之一,我们仍然感到缺少一套系统化的、覆盖该领域最新技术的微电子及集成电路教材。公司总部有一个教材指导委员会(Curriculum Advisory Board),他们基于多年的研究积累,针对本科生和研究生主持开发了一套微电子及集成电路课程体系,当我了解到相应的教学课程内容后,便立即想到如果以此为参考帮助国内开发一套微电子及集成电路领域的教材和参考书,应该是非常有意义的。此想法得到了时任国家集成电路人才培养基地专家委员会主任委员浙江大学严晓浪教授和委员会副主任委员清华大学王志华教授的赞同,也得到了 Synopsys 公司全球总裁陈志宽博士的积极支持。一年多后的今天,我们终于见到了这套丛书第一批16本的面世!这是主编王志华教授和30多位编审者们辛勤劳动的成果,也要感谢李志坚院士、王阳元院士这样德高望重的多位业界前辈对丛书编著选题的把握、对方向的关注、对内容的裁夺等。我也非常高兴我的同事和我的公司在这件事情上面所作的微薄贡献。

一直以来,参与并推动中国集成电路产业的腾飞是我们的梦想。回望过去,中国每一天都在进步,中国集成电路产业每一年都在成长。世界范围内产业的大迁移、国内市场需求的强劲拉动、有利的产业政策和创业环境,正带给中国集成电路产业发展最佳的契机。而人才

培养是最重要的环节和基础,是漫长的付出和努力、是艰辛的孕育和耕耘、是由量变到质变的积累,直到腾飞前的化蛹成蝶。在老中青几代人的共同努力下,相信在不久的将来我们的行业一定会创造出一座座的金山、一定会拥有一大批“点石成金”手!“长风破浪会有时,直挂云帆济沧海”。我由衷地希望这套丛书的出版可以帮助实现我们共同的心愿,并殷切期待丛书下一批十多本著作的尽早面世!



2009 年 12 月于北京

主编序言

潘建岳先生和我是清华校友,一直以来,他和他的同仁对国内集成电路行业的发展给予了极大的关注和支持。2007年初,时任 Synopsys 中国区总裁的潘建岳先生提出,将 Synopsys 公司教材指导委员会(Curriculum Advisory Board)主持开发的课程体系和一套以 IC 设计为主的教学课件赠送给国家集成电路人才培养基地专家委员会,期望对国内集成电路设计人才培养特别是教材建设有所帮助。当时,教育部和科技部已经批准在 20 所大学建立(含筹建)集成电路人才培养基地,国务院学位办已经批准在约 40 个大学招收集成电路工程领域的工程类硕士研究生,教育部也于 2007 年已经批准在 19 所院校建设微电子学专业集成电路领域的特色本科专业建设。除此之外,电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术等学科的高层次人才,也都需要具备集成电路知识。受潘建岳先生的建议及赠送的材料的启发,集成电路人才培养基地专家委员决定编写《微电子与集成电路技术丛书》并委托我担任主编。

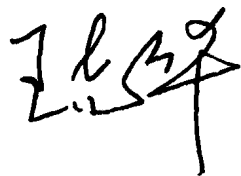
为做好丛书的编写工作,潘建岳先生和我一起专门拜访了王阳元院士,请求指导和支持。王阳元院士是我国杰出的教育家和科学家,为我国微电子事业的创立和发展做出了不可磨灭的功绩。得知我们计划编写一套《微电子与集成电路技术丛书》之后,王院士除了表示支持之外,还特别叮嘱我们关心图书的内容和质量。丛书要为读者提供完整的知识体系,提供正确和准确的技术内容,对于飞速发展和变化的微电子和集成电路领域,要力求反映最新的技术进展。但图书的价值,不仅体现在当前最新知识的传播上,在图书的技术内容过时之后,书籍依然承载着历史和文化的价值。

担任主编工作后我一直有一种忐忑不安的心情,主要是感到自己不足以把握日新月异的集成电路知识,更没有勇气面对王阳元院士讲的书籍的历史文化价值的承载作用。作为国家集成电路人才培养基地专家委员会中的一员,在诸多年高德劭的前辈的指派下,我诚惶诚恐地承担了这个任务。

我们邀请了国内在微电子和集成电路领域第一线工作的年轻学术骨干参加丛书编写。他们不但具有相当丰富的教学经验,而且活跃在相关科学研究的前沿,其中还有部分教师参加过国家集成电路人才培养基地专家委员会和国家外国专家局支持的技术培训。他们的知识、经验和奉献精神,是本丛书面世的基础;我们同时聘请了一批国内同行中的资深专家参加丛书编委会,他们除了为图书选题、内容取舍出谋划策之外,还作为审稿人对图书的技术内容、讲述方法甚至语言文字严格把关。他们的工作,不仅保证了图书编写质量,而且是对国内微电子和集成电路领域年轻才俊的大力扶持和帮助。感谢这些知识渊博、德高望重的前辈。感谢教育部高等教育司、科技部高新技术及产业化司、原信息产业部电子产品司的领导对图书编写和出版的支持,他们对教育、科技发展以及微电子行业需求的深入了解,使丛书的编写得以适应行业的需求。感谢浙江大学严晓浪教授,他作为国家集成电路人才培养

基地专家委员会的主任委员,始终关心和指导着丛书编写的各个环节。

现在,《微电子与集成电路技术丛书》第一批 16 种图书终于面世了! 本丛书内容涵盖了微电子、数字和模拟集成电路的基本原理和技术知识,还包括了射频电路设计、数模混合信号处理、嵌入式和高性能处理器、低功耗芯片设计、SoC 设计方法学、EDA 工具及应用等广泛的现代专门课题内容。我们期望丛书不辜负微电子和集成电路领域专家的期望,以全面的选题、丰富的内容、准确的知识、科学的表述传播微电子和集成电路领域的知识,满足我国集成电路领域人才培养的需求。如果该丛书能为我国微电子和集成电路领域的科技发展作出点滴贡献,功劳属于图书的编写者以及为图书的面世贡献了力量的众多无名英雄。



2009 年 11 月于北京清华园

前言

随着我国航天事业的快速发展,航天工程对适应于空间环境的抗辐射集成电路的需求不断增加,质量等级要求不断提高。编者试图为读者尽可能全面地、系统地介绍抗辐射集成电路研制过程中所需要的相关基础知识。

本书主要研究辐射环境下电子系统所需的集成电路,要求读者具有半导体物理、半导体器件、集成电路设计等方面的基础知识。本书可作为高等学校电子科学与技术、微电子学与固体电路专业类选修教材,或从事相关研究的科技人员的参考书。

本书第1章介绍抗辐射集成电路技术发展过程。第2、3章介绍辐射环境及辐射效应的背景知识。第4章介绍双极类集成电路的抗辐射设计方面的技术。第5章介绍MOS类集成电路的抗辐射设计方面的技术。微处理器、存储器以及现场可编程门阵列(FPGA)电路是航天电子系统中常用核心器件,第6、7、8章分别介绍微处理器、存储器和FPGA类集成电路的抗辐射设计方面的技术。虽然CMOS代工厂(Foundry)可以提供完整的设计规则、模型参数,甚至完善的标准单元库或IP核,但是这些参数、单元库和IP核通常不包含抗辐射方面的信息,需要设计公司(Fabless)自己设法提取这些信息,所以在第9章安排了模型参数方面的知识。集成电路常规可靠性测试、试验方法相对比较成熟,但是对集成电路抗辐射性能的完备的、正确的评估是非常复杂和极其困难的,所以在第10章安排了集成电路抗辐射性能评估技术方面的知识。

本书系“微电子与集成电路技术丛书”之一,这套丛书是在清华大学出版社的大力支持下,由国际知名EDA厂商新思科技赞助,国家集成电路人才培养基地专家指导委员会组编而成的。清华大学王志华教授作为丛书主编,做了大量的工作。

在本书编写过程中,参考了国内外有关单位和学者的著作和文章,在此一并表示感谢。书中有些内容是编者研发团队的成果,借此机会向我的同事和学生们表示真诚的感谢。

北京微电子技术研究所的赵元富研究员作为本书主审,在审阅中,提出许多宝贵意见。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足,恳请读者批评指正。

编者

2010年12月于北京

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 抗辐射集成电路技术发展概况	1
1.2 抗辐射集成电路技术的发展方向	5
1.2.1 SOI 技术	5
1.2.2 抗辐射设计技术	6
1.2.3 新材料、新结构	6
1.3 本书的章节安排	7
第 2 章 辐射环境	8
2.1 空间环境	8
2.1.1 内辐射带	8
2.1.2 槽形辐射带	9
2.1.3 外辐射带和准俘获区	9
2.1.4 地磁尾区和低高度区	9
2.1.5 银河宇宙射线	9
2.1.6 太阳耀斑	9
2.2 核爆炸辐射环境	10
2.2.1 大气层外爆炸	10
2.2.2 大气层内爆炸	11
2.3 核动力辐射	12
第 3 章 辐射效应	13
3.1 总剂量辐射效应	13
3.2 中子辐射效应	14
3.3 瞬时辐射效应	15
3.4 单粒子效应	16
3.4.1 单粒子瞬变效应和单粒子翻转效应	16
3.4.2 单粒子门锁效应	18
3.4.3 单粒子功能中断	19
3.4.4 单粒子烧毁效应和单粒子栅穿效应	19
3.5 剂量增强效应	19

3.6 低剂量率效应	20
第4章 抗辐射双极集成电路设计	21
4.1 双极集成电路的制造工艺	21
4.2 双极集成电路的晶体管	26
4.3 双极集成电路的二极管	32
4.4 集成电路中的无源元件	34
4.5 双极晶体管的辐射效应	42
4.5.1 中子辐射对双极晶体管特性的影响	42
4.5.2 γ 射线或X射线的瞬时辐射效应	45
4.6 结构及工艺加固技术	46
4.6.1 减薄基区宽度	46
4.6.2 优化集电区参数	47
4.6.3 优化金属化材料	47
4.6.4 表面钝化技术	47
4.6.5 预先增加基区复合	48
4.7 电路设计加固技术	48
4.7.1 中子注量加固	48
4.7.2 对瞬时辐射加固技术	49
4.8 双极数字电路	50
4.9 双极模拟电路	50
4.9.1 运算放大器	50
4.9.2 比较器	53
4.9.3 稳压电源	54
第5章 抗辐射MOS集成电路设计	56
5.1 MOS集成电路的基本制造工艺	56
5.2 材料及工艺加固技术	61
5.2.1 单晶硅材料	62
5.2.2 外延层材料	64
5.2.3 SOS和SOI材料	66
5.2.4 SOI CMOS电路特点	69
5.2.5 SOI CMOS工艺加固技术	78
5.3 电路设计加固技术	80
5.3.1 电路结构加固技术	80
5.3.2 版图设计加固技术	88
第6章 微处理器加固技术	92
6.1 PDSOI 80C51 微控制器的系统架构	93

6.1.1	PDSOI 80C51 微控制器的 CPU 结构	93
6.1.2	PDSOI 80C51 微控制器的存储器结构	95
6.1.3	PDSOI 80C51 微控制器的特殊功能寄存器结构	96
6.1.4	PDSOI 80C51 微控制器的 I/O 端口结构	97
6.1.5	PDSOI 80C51 微控制器的定时器/计数器结构	98
6.1.6	PDSOI 80C51 微控制器的中断系统结构	98
6.2	PDSOI 80C51 微控制器的工作方式	100
6.2.1	复位工作方式	100
6.2.2	节电工作方式	100
6.2.3	程序执行方式	101
6.3	PDSOI 80C51 微控制器的工作时序	101
6.3.1	指令的取指/执行时序	101
6.3.2	访问片外 ROM/RAM 的指令时序	102
6.4	PDSOI 80C51 微控制器的指令系统	104
6.5	PDSOI 80C51 微控制器的电路设计	106
6.5.1	输入输出端口的电路设计	106
6.5.2	定时器/计数器 2 的电路设计	109
6.6	PDSOI 80C51 微控制器电路的加固设计	112
6.6.1	PDSOI 80C51 微控制器电路设计	112
6.6.2	PDSOI 80C51 微控制器的版图设计	113
6.6.3	PDSOI 80C51 微控制器的测试及可靠性试验	113
第 7 章	存储器加固技术	116
7.1	静态随机存取存储器	116
7.1.1	SRAM 的基本结构	116
7.1.2	SRAM 的性能和时序	117
7.1.3	SRAM 的读写操作	118
7.1.4	字线位线的结构优化	121
7.1.5	存储单元的参数优化	122
7.1.6	灵敏放大器	125
7.1.7	时序以及控制信号的处理	127
7.2	抗辐射 SOI CMOS 静态随机存储器	128
7.2.1	抗辐射 SOS CMOS SRAM	128
7.2.2	抗辐射 SOI CMOS SRAM	128
7.3	DRAM	136
7.3.1	DRAM 的基本结构	137
7.3.2	DRAM 中的软失效	137
7.4	PROM	139
7.4.1	熔丝型 PROM	139

7.4.2 结破坏型 PROM	142
第 8 章 FPGA 加固技术	143
8.1 FPGA 的类型	143
8.1.1 基于反熔丝结构的 FPGA	143
8.1.2 基于 SRAM 结构的 FPGA	145
8.1.3 基于 Flash 结构的 FPGA	146
8.1.4 兼有 SRAM 块和反熔丝逻辑的 FPGA	146
8.2 基于反熔丝结构的 FPGA 中的辐射效应及加固措施	147
8.2.1 辐射效应	147
8.2.2 工艺加固措施	147
8.2.3 电路设计加固措施	147
8.3 基于 SRAM 结构的 FPGA 中的辐射效应及加固措施	148
8.3.1 辐射效应	148
8.3.2 工艺加固措施	148
8.3.3 电路设计加固措施	149
第 9 章 模型参数	153
9.1 模型参数的分类	153
9.1.1 器件模型	153
9.1.2 互连模型	155
9.2 提取模型参数的数据获取	156
9.3 MOS 模型参数提取	157
9.3.1 BSIM SOI 模型	157
9.3.2 与总剂量辐射相关的模型参数	159
9.3.3 与抗单粒子辐射相关的模型	160
9.4 BJT 模型	164
第 10 章 集成电路抗辐射性能评估	167
10.1 抗总剂量辐射性能	168
10.1.1 试验系统	168
10.1.2 测试方法	170
10.1.3 测试内容	174
10.2 抗单粒子辐射性能	174
10.2.1 试验系统	174
10.2.2 试验方法	176
10.2.3 测试内容	181
10.3 抗瞬时辐射性能	182
10.3.1 剂量率感应锁定	182

10.3.2	数字微电路的剂量率感应翻转	188
10.3.3	线性微电路的剂量率感应翻转	192
10.4	抗中子辐射性	193
10.4.1	试验系统	194
10.4.2	试验方法	194
10.4.3	测试内容	195
词汇表		196
参考文献		200