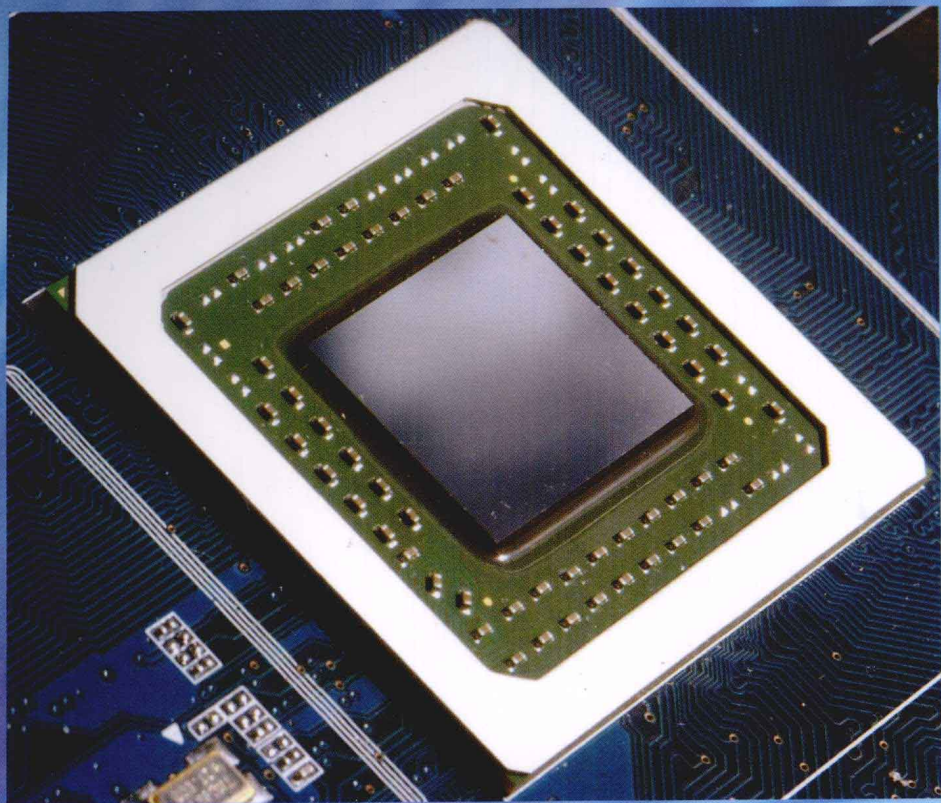


微电子与集成电路技术丛书

国家集成电路人才培养基地专家指导委员会组编



System-level FPGA Design and Application

系统级FPGA 设计与应用

王伶俐 周学功 王颖 编著

Wang Lingli Zhou Xuegong Wang Ying

童家榕 校

Tong Jiarong

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

System-level FPGA Design and Application

系统级FPGA 设计与应用

王伶俐 周学功 王颖 编著

Wang Lingli Zhou Xuegong Wang Ying

童家榕 校

Tong Jiarong

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书基于信息时代的特征和发展需求,分析并比较了各种可编程技术和可编程器件的特点,阐述了系统级 FPGA 的优越性,并介绍可编程逻辑器件的基础知识、基本原理和软硬件协同设计方法。本书并不从已有的商用 FPGA 器件和软件工具的角度介绍系统级 FPGA 的结构和应用技术,而是从可编程性这项核心技术出发,介绍了实现可编程性的底层硬件结构、设计数字电路所需要的 EDA 算法和软硬件协同设计技术,然后以商用 FPGA 器件和软件工具作为示例说明。这样可以把握商用器件结构及其开发环境的技术途径、发展趋势以及与其他信息技术的融合与交互过程。

全书共有 7 章。在第 1 章介绍数字信息技术平台后,第 2 章开始介绍与软件可编程性相对的各种硬件可编程技术和可编程硬件资源结构。第 3 章从通用型 CPU 的编译流程出发,介绍基于 FPGA 的数字电路设计流程和逻辑综合、工艺映射、布局布线、时序分析、基于 JTAG 的在线分析技术等内容。第 4 章和第 5 章分别介绍基于系统级 FPGA 的嵌入式系统的硬件和软件设计方法,主要讨论常见的微处理器、片上总线和自定义外设电路的设计方法和嵌入式系统软件开发技术。第 6 章介绍基于 FPGA 的可重构系统及其设计方法。第 7 章通过一个嵌入式系统设计实例对前面各章所学到的知识进行应用。本书附录部分还提供了一些上机材料。

本书适合高等院校或研究机构电子信息和计算机技术专业高年级大学生或研究生阅读,同样可供通信、机电类研究生、大学教师、电子电路设计和测试工程师等参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

系统级 FPGA 设计与应用/王伶俐,周学功,王颖编著.--北京:清华大学出版社,2012.1
(微电子与集成电路技术丛书)

ISBN 978-7-302-27691-3

I. ①系… II. ①王… ②周… ③王… III. ①可编程序逻辑器件—系统设计
IV. ①TP332.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 267879 号

责任编辑:盛东亮

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:14.75 字 数:364 千字

版 次:2012 年 1 月第 1 版 印 次:2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00 元

产品编号:042328-01

序一

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。

序

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。

和作报告的

少数人左右

表明

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。

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。

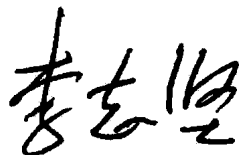
(李志坚院士为本丛书写的序言手稿)

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。

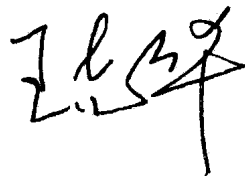
为做好丛书的编写工作,潘建岳先生和我一起专门拜访了王阳元院士,请求指导和支持。王阳元院士是我国杰出的教育家和科学家,为我国微电子事业的创立和发展做出了不可磨灭的功绩。得知我们计划编写一套《微电子与集成电路技术丛书》之后,王院士除了表示支持之外,还特别叮嘱我们关心图书的内容和质量。丛书要为读者提供完整的知识体系,提供正确和准确的技术内容,对于飞速发展和变化的微电子和集成电路领域,要力求反映最新的技术进展。但图书的价值,不仅体现在当前最新知识的传播上,在图书的技术内容过时之后,书籍依然承载着历史和文化的价值。

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

2004年 Intel 公司由于功耗等技术原因取消了单核处理器的后续研发计划,标志着通用型 CPU 进入了多核时代,这就意味着 CPU 性能的提高必须突破之前主要依赖于半导体工艺技术进步的技术途径。在通用型处理器结构方面,ALU 算术逻辑单元所占的芯片面积不到 10%,这就是说 CPU 内部大部分的晶体管面积和功耗都不是直接用于算术逻辑运算,而是被多级高速缓存、指令译码、存储控制与管理、分支预测等辅助单元所占用,因此,通用型 CPU 的计算和功耗效率是非常低的。相比较而言,GPU 处理器面向图形处理等应用,大大简化了内部的高速缓存和控制逻辑单元,从而让更多的晶体管直接参与计算,使得一个芯片内部包含上百个计算核。在 2010 年 11 月公布的全球最快超级计算机 TOP500 榜单中,“天河一号”超级计算机采用了 GPU 加速结构而首次让中国的机器位于排行榜榜首。

但不管是通用型 CPU、GPU 或者 DSP 处理器,其核心结构都是基于 1945 年冯·诺依曼等人提出的“存储程序计算机”结构,其中存储单元和计算单元在硬件上就是分开的。处理器的运行过程包括取指令、译码、取数、执行、结果返回等流水线过程,其中只有中间的“执行”这一步骤是真正用于计算的。因此,为了充分发挥半导体工艺技术进步带来的成果,提高芯片的性能和能耗效率,必须从底层的核心硬件结构和执行方式进行突破,从而让大部分晶体管能够直接参与计算任务。

可编程逻辑器件从 20 世纪 80 年代以来发展非常迅速。由于早期可编程逻辑器件的接口功能强大,因此它主要用于胶合逻辑应用。后来逐步放弃了基于可编程与或阵列的核心结构,采用了基于查找表的可编程单元结构,从而让它的逻辑功能不断强大,成为专用集成电路原型验证的最佳途径。在 FPGA 结构中,查找表既可以作存储单元,也可以作为可编程逻辑单元。逻辑单元之间不再以总线的结构,而是以复杂的分布式层次化互连资源进行通信。这些结构上的特点就已经突破了“存储程序计算机”的局限性。至今可编程逻辑器件内部直接嵌入了高速通信 IO 核、微处理器核、存储器核、DSP 模块和复杂的时钟管理硬件模块,从而大大提高了芯片的数据通信与计算能力。我们把这种包含了基于细粒度查找表结构的可编程逻辑单元和各种粗粒度的数据通信与计算单元的现场可编程逻辑器件称为系统级 FPGA。为了充分发挥半导体工艺的优势,系统级 FPGA 采用了业界最领先的半导体工艺技术。从应用领域来看,系统级 FPGA 正在不断侵占 ASIC/ASSP、CPU、DSP 器件的市场,涵盖了通信、汽车电子、医疗设备、消费类电子、高性能计算、嵌入式系统、航空航天、工业控制等领域。

虽然基于配置流与硬件可编程技术的系统级 FPGA 具有很好的并行性和计算效率,在结构方面克服了“存储程序计算机”的结构劣势,在运行过程方面不再需要指令、译码、取数等指令流操作,但是它的硬件结构还不够成熟,工具链过于复杂。在传统的通用型 CPU 领域,GCC 开源编译器基本上支持各种商用处理器,能够产生二进制可执行文件。但是至今

为止还没有一个统一的 FPGA 编译器,能够支持各种系统级 FPGA 的可编程结构,从而产生正确的可编程配置文件。也没有一个成熟的工具链,能够有效地支持各种系统级 FPGA 的软硬件协同仿真、高层次综合和软硬件混合在线调试等技术。为了充分发挥系统级 FPGA 所提供的硬件优势及其工具链的作用,用户需要了解它的基本硬件结构、EDA 软件算法和软硬件协同设计等知识。本书结合复旦大学专用集成电路与系统国家重点实验室在可编程逻辑器件和可重构计算领域的项目开发经验和教学体会,分析比较了各种可编程逻辑器件的结构,定性地说明了基于查找表 FPGA 结构的优越性。在此基础上介绍了 FPGA 工具链后端 EDA 流程和基本算法,并且结合软硬件协同设计技术,提供了基于系统级 FPGA 的可重构系统和嵌入式系统设计实例。

在本书的写作和校对过程中,我们得到了国家重点实验室 CAD 教研室的老师和学生的多方帮助,他们有唐璞山教授、曾璇教授、赵文庆教授、来金梅教授、曹伟博士、谭道珍老师和研究生陈志辉、刘智斌、叶晓敏、邵海波、陈帅、陈佳临、王侃文、陈利光、包杰等。同时也向我们的家人表示歉意,我们没有在周末和假期的时候,安排足够的时间和家人一起度过,再次向他们的付出表示深切的感谢。

王伶俐 周学功 王颖 童家榕

2011年8月

复旦大学张江校区

目录

第 1 章 数字信息技术平台	1
1.1 数字信息时代的发展需求	1
1.1.1 信息时代的来临及其特征	1
1.1.2 信息的度量与变换处理	9
1.1.3 半导体技术和数字集成电路的发展	12
1.1.4 集成电路的现场可编程性需求	18
1.2 存储器和现场可编程性	22
1.3 基于通用微处理器的信息处理技术	27
1.4 DSP 技术及其应用	31
1.5 专用数字集成电路设计	33
1.6 系统级 FPGA 计算平台的特点	35
1.7 本书结构	37
习题	38
参考文献	38
第 2 章 系统级 FPGA 硬件结构	40
2.1 PLD 和 FPGA 的整体结构	40
2.1.1 传统 PLD 器件的单元结构	42
2.1.2 数据通路与 FPGA	47
2.2 常用的硬件可编程技术	50
2.2.1 配置数据和用户数据的区别	50
2.2.2 基于存储的配置技术	53
2.3 经典 FPGA 的硬件结构	55
2.3.1 可编程逻辑单元	55
2.3.2 可编程互连结构	60
2.3.3 可编程 IO 单元	67
2.4 系统级 FPGA 结构特点	69
2.4.1 嵌入式存储器	70
2.4.2 嵌入式微处理器软硬核比较	71
2.4.3 嵌入式 DSP 模块	72
2.5 可编程逻辑单元结构比较	73

习题	77
参考文献	78
第3章 基于FPGA的数字电路设计	80
3.1 高级描述语言编译和芯片版图生成流程	80
3.1.1 基于通用处理器的软件编译流程	80
3.1.2 基于EDA工具的数字电路设计流程	83
3.2 基于FPGA的数字电路设计流程	90
3.3 基于LUT的FPGA工艺映射	92
3.3.1 枚举算法	93
3.3.2 逻辑单元块打包	95
3.3.3 逻辑再综合	97
3.4 时序驱动的布局布线和物理综合时序优化技术	98
3.4.1 时序驱动布局与布线	98
3.4.2 物理综合技术	102
3.5 时序分析	105
3.5.1 动态时序仿真和静态时序分析	105
3.5.2 时序图	106
3.5.3 延时计算	107
3.5.4 关键路径	109
3.5.5 建立时间和保持时间检查与分析	110
3.6 基于JTAG的在线分析技术	112
3.6.1 JTAG基本结构和原理	113
3.6.2 基于JTAG软扫描链的在线分析方法	116
3.7 ASIC和FPGA设计规范比较	119
习题	123
参考文献	124
第4章 基于FPGA的嵌入式系统硬件设计	125
4.1 嵌入式系统及其FPGA实现	125
4.1.1 FPGA在嵌入式系统中的应用	125
4.1.2 FPGA在可编程片上系统设计中的应用	126
4.2 嵌入式微处理器	127
4.2.1 ARM	127
4.2.2 PowerPC	128
4.2.3 Nios II	128
4.2.4 MicroBlaze和PicoBlaze	129
4.3 片上总线	129
4.3.1 Avalon总线	130

4.3.2	AMBA 总线	132
4.3.3	CoreConnect 总线	133
4.3.4	Wishbone 总线	133
4.3.5	四种片上总线的比较	134
4.4	自定义外设电路的设计	135
4.4.1	自定义外设的结构	135
4.4.2	基于 Xilinx FPGA 的外设接口设计实例	136
4.4.3	基于 Altera FPGA 的外设接口设计实例	140
4.5	基于 Altera FPGA 的嵌入式系统硬件设计	142
4.5.1	SOPC Builder 简介	142
4.5.2	SOPC Builder 设计流程	144
4.6	基于 Xilinx FPGA 的嵌入式系统硬件设计	145
4.6.1	Platform Studio 简介	145
4.6.2	Platform Studio 设计流程	146
	习题	148
	参考文献	148
第 5 章	基于 FPGA 的嵌入式系统软件开发	149
5.1	嵌入式系统软件开发概述	149
5.2	嵌入式系统软件结构	150
5.3	嵌入式系统软件开发工具	151
5.4	自定义外设驱动设计	153
5.4.1	设备驱动程序的层次结构	154
5.4.2	基于 Altera FPGA 的外设驱动设计实例	154
5.4.3	基于 Xilinx FPGA 的外设驱动设计实例	156
5.5	Altera 与 Xilinx 的软件设计工具	158
5.5.1	Altera Nios II IDE	158
5.5.2	Xilinx Platform Studio 和 SDK	160
	习题	163
	参考文献	163
第 6 章	基于 FPGA 的可重构系统	164
6.1	可重构计算概述	164
6.2	可重构系统及其分类	166
6.2.1	系统耦合方式	166
6.2.2	可重构单元粒度	168
6.2.3	系统重构方式	168
6.3	模块化的部分可重构系统设计方法	171
6.3.1	设计方法	171

6.3.2 设计流程·····	171
6.4 可重构系统设计实例·····	172
6.5 本章小结·····	176
习题·····	177
参考文献·····	177
第7章 系统级FPGA综合设计实例 ·····	179
7.1 DE2开发板简介·····	179
7.2 应用实例硬件设计·····	180
7.2.1 系统架构设计·····	180
7.2.2 顶层模块实现·····	182
7.3 自定义外设及其驱动程序设计·····	183
7.3.1 SRAM接口组件·····	184
7.3.2 七段数码显示组件·····	184
7.3.3 I ² C接口组件·····	186
7.3.4 音频输入/输出接口组件·····	188
7.4 软件设计·····	191
参考文献·····	193
附录A 七段数码管显示设计实验 ·····	194
附录B 七段数码管计数实验 ·····	198
附录C 字符串滚动显示实验 ·····	201
附录D 英文缩写对照表 ·····	205