

国外电子与通信教材系列



# 超大规模集成电路 与系统导论

Introduction to  
VLSI Circuits and Systems

[美] John P. Uyemura 著

周润德 译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 超大规模集成电路与系统导论

Introduction to VLSI Circuits and Systems

【美】 John P. Uyemura 著

周润德 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍 CMOS 数字大规模集成电路与系统设计的基础。全书分为三部分。第 1 部分介绍集成电路的逻辑与物理层设计,其中包括 CMOS 静态门的逻辑设计与信号控制,芯片生产与制造工艺,版图设计与 CAD 工具。第 2 部分讨论 CMOS 电子电路,介绍 MOSFET 的特性和开关模型,各类逻辑电路,包括高速 CMOS 逻辑电路,同时介绍分析逻辑链延时的经典方法和新方法。第 3 部分为 VLSI 的系统设计,介绍 Verilog<sup>®</sup> HDL 高层次描述语言,分析数字系统单元库部件以及加法器和乘法器的设计,并且研究物理设计中应当考虑的问题,包括时钟技术、布局布线、信号串扰、测试与功耗问题。

本书可作为电子、电气、自动化与计算机等专业本科高年级学生及研究生课程的教科书,也可作为相关科技和工程技术人员的参考书。

Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

本书简体中文专有翻译出版权由 John Wiley & Sons Inc. 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:01-2003-0588

### 图书在版编目(CIP)数据

超大规模集成电路与系统导论/(美)尤耶缪拉(Uyemura, J. P.)著;周润德译.

北京:电子工业出版社,2004.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Introduction to VLSI Circuits and Systems

ISBN 7-5053-9424-X

I. 超... II. ①尤...②周... III. ①超大规模集成电路—电路设计—教材②超大规模集成电路—系统设计—教材 IV. TN470.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 111120 号



责任编辑:杨丽娟 特约编辑:明足群

印 刷:北京四季青印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:31 字数:794 千字

印 次:2006 年 2 月第 3 次印刷

定 价:56.00 元 (含光盘一张)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研单位中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择和自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为作好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严谨与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

- |     |            |  |
|-----|------------|--|
| 主任  | 吴佑寿        | 中国工程院院士、清华大学教授   |
| 副主任 | 林金桐<br>杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师<br>总参通信部副部长、中国电子学会会士、副理事长<br>中国通信学会常务理事    |
| 委员  | 林孝康        | 清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
|     | 徐安士        | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                |
|     | 樊昌信        | 西安电子科技大学教授、博士生导师<br>中国通信学会理事、IEEE 会士                         |
|     | 程时昕        | 东南大学教授、博士生导师<br>移动通信国家重点实验室主任                                |
|     | 郁道银        | 天津大学副校长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员                 |
|     | 阮秋琦        | 北方交通大学教授、博士生导师<br>计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长                     |
|     | 张晓林        | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员     |
|     | 郑宝玉        | 南京邮电学院副院长、教授、博士生导师<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员                  |
|     | 朱世华        | 西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员       |
|     | 彭启琮        | 电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长<br>教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员   |
|     | 徐重阳        | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任<br>教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员        |
|     | 毛军发        | 上海交通大学教授、博士生导师、电子信息学院副院长<br>教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员            |
|     | 赵尔沅        | 北京邮电大学教授、教材建设委员会主任   |
|     | 钟允若        | 原邮电科学研究院副院长、总工程师   |
|     | 刘彩         | 中国通信学会副理事长、秘书长   |
|     | 杜振民        | 电子工业出版社副社长   |

## 译 者 序

VLSI(超大规模集成电路)的快速发展是 20 世纪 70 年代以来人类科学历史上的一个奇迹。它是计算机和通信领域的支柱,已经成为其他科学和工程技术的基础。现在 VLSI 的设计和应用已经渗透到各个工程技术领域,几乎每个工程学科的学生和工程技术人员都要了解 VLSI 方面的知识,因此十分需要一本有关 VLSI 电路与系统设计,能够适用于各类工程专业的教科书和自学教材。美国乔治亚理工学院(Georgia Institute of Technology)的 John P. Uyemura 教授 2002 年所著的《超大规模集成电路与系统导论》(Introduction to VLSI Circuits and Systems)就是这样一本优秀的教材。

John P. Uyemura 教授在美国 Georgia Institute of Technology 长期从事 VLSI 领域的研究和教学,有很深的学术造诣和丰富的教学经验,在本书出版之前已经出版了多本这一领域的教科书。本书则是他最近的又一力作,内容深入浅出,从介绍最基础的知识开始,逐步讨论深层次的专题,每章的最后列出许多很有价值的参考资料。因此本书不仅可以作为电子、电气、自动化与计算机等专业本科高年级学生及研究生课程的教科书,也可作为相关科技和工程技术人员参考书。

本书共 16 章。除了第 1 章 VLSI 概论以外,其余分为三部分。第 1 部分从介绍 CMOS 技术的逻辑设计开始,逐步进入物理层次,其中包括芯片生产与制造工艺,版图设计和 CAD 工具。第 2 部分讨论 CMOS 电子电路,介绍 MOSFET 的特性和开关模型,各类逻辑电路,包括高速 CMOS 逻辑电路,同时介绍分析逻辑链延时的经典方法和新方法。第 3 部分为 VLSI 的系统设计,介绍 Verilog<sup>®</sup> HDL 高层次描述语言,分析数字系统单元库部件以及加法器和乘法器的设计,并且研究物理设计中应当考虑的问题,包括时钟技术、布局布线、信号串扰、测试与功耗问题。

本书在翻译过程中得到了电子工业出版社的热心指导和大力支持,得到了清华大学微电子学研究所领导和多位教师的关心,特别是得到了朱钧教授、贺祥庆教授、吴行军副教授等多位老师的帮助与指正。我的博士研究生戴宏宇、张盛、王乃龙、杨骞、肖勇、张建良等在完成译稿过程中给予了我很大的支持。我的妻子金申美和女儿周晔不仅帮助翻译和修改了部分章节,而且完成了全部的文字输入和文稿整理。在此一并深表谢意。

最后,本书虽经仔细校对,但由于译者水平有限,文中定有不当或欠妥之处,望读者批评指正。

译 者

2003 年 10 月于清华园



# 前 言

VLSI 已经成为现代技术的一个主要推动力。该领域是计算和通信的基础,并且仍在以神奇的步伐继续快速发展。

本书作为一本教科书涵盖数字 CMOS VLSI 系统设计的基础。它可用于电气工程、计算机工程和计算机科学领域高年级大学生的第一门课程。在补充杂志文献后,也可用于一年级研究生的课程。本书的核心内容可以用 10 周的课时讲完,但是全部教材足够 15 周的课时使用,或者加上最近文献的阅读可以作为两个学期(quarter 制)的教材。

学习本书不需要 VLSI 或 CMOS 的背景知识,但应该学过电气或计算机工程的核心课程,其中最重要的是数字逻辑设计和电路分析。本书电子学部分从最基本的概念开始,所以计算机科学专业的学生应当能够跟上讨论。本书是 VLSI 领域的入门书,并不要求预先了解这一领域。它也适用于学生和专业人员自学。虽然讨论是从最基础开始的,但也涉及高水平课题的深层次分析。

## 内容介绍

在第 1 章简要介绍设计层次化的一些术语和概念后,教材分为三个主要部分。

第 1 部分——硅片逻辑。介绍 CMOS 技术中逻辑设计的概念。它引导学生从逻辑设计概念进入 CMOS 电路设计。第 2 章介绍作为简单逻辑控制开关的 MOSFET,然后集中于布尔逻辑层次上的 CMOS 静态逻辑门设计。第 3 章初步了解物理设计,将集成电路看做用来控制信号流的一组图形材料层。这使我们从开关级的描述向下进入物理层。第 4 章覆盖硅芯片生产的内容,考察生产工艺的一般和特殊方面。第 5 章是本部分讨论的最高点,其中考察了物理设计和版图的细节问题,对设计体系和单元库的讨论将这些材料与 CAD 工具的使用联系起来。第 1 部分学习结束后,学生就能进行 CMOS 的基本逻辑设计并了解它们是如何转换到硅环境中去的。

第 2 部分是 CMOS 的电路部分——从逻辑到电路。它侧重于系统设计层的简单含义和开关模型。第 6 章用平方定律公式说明 MOSFET 的特征,用来建立线性 RC 开关模型。第 7 章覆盖 CMOS 逻辑电路的电气特性。第 8 章介绍高速 CMOS 链,讨论经典方法,但也包括 Logical Effort(逻辑努力)一节。第 9 章考察一些高级 CMOS 逻辑系列,内容比较专业化,适合于某些读者。

余下的章节包含在第 3 部分中——VLSI 系统设计。材料的选择将逻辑电路、物理版图以及电子电路联系在一起,构成 VLSI 系统设计的单一学科。第 10 章介绍 Verilog<sup>®</sup> HDL,本书选用它作为在某些部分进行高层次描述的基础;已经熟习 VHDL 的学生能够很快地掌握 Verilog。第 11 章把高层次 HDL 描述与逻辑、电路和物理实现联系在一起,从这个角度分析一些数字单元库部件;采用这一方法的目的是要说明如何写高层次的抽象描述,然后考察在 CMOS



VLSI 中用来实际构成部件的各种选择。同样的思想也用于第 12 章中介绍加法和乘法电路。这两章都强调在层次化设计中各层次间的相互作用。第 13 章包含存储电路及其组织结构。第 14 章是芯片级物理设计的一些考虑,讨论互连线模型、串扰、布局以及布线等问题。同时对电源分配技术,I/O 电路和低功耗设计做了介绍。第 15 章有关系统级设计,介绍时钟驱动器和分配树以及像流水线 and 位片设计这样的系统级数据通路技术。本书以简单介绍可靠性和测试的第 16 章作为结束。

作者致力于展现 VLSI 是一门交叉学科,它依赖于许许多多的专家在各个层次上的共同工作。重点放在说明不同观点间的相互作用,以及在一个层次上所做的设计选择,如何对其他所有的层次产生影响。

## 本书的宗旨

“VLSI”对不同的人意味着不同的含义。它由许多不同的专业组成,它们之间以一种独特的方式相互作用。一个真正的“VLSI 设计者”应该是在某个特定领域工作,但要了解各单元是如何相互作用,形成一个系统的。我在 Georgia Tech 大学教过好几年本科和研究生的 VLSI 课程。这里介绍的观点是我发现对引导各种背景基础的学生进入该领域非常有效的观点。

对于每个专题都可以在其他资料中找到更为详细的讨论。本教科书与专著的差别在于介绍的角度、深浅和应用。它为学习 VLSI 的主要方面提供一个基本统一的基础。各专题的选择基于它们对全面了解该领域的重要性。所进行的分析对推导有用的结果已经足够详细,当然要作为专家又当别论。

选择在本领域工作的学生应当集中学习一到两个领域。例如作者本人教授的高年级本科生和研究生水平的数字电子电路课程远比这本教材要深得多。在每章的后面都列有参考资料以供对各专题更深入的学习。没有列出杂志文章,考虑这不是一本专著。

## 教材的使用

每章的内容相当于 3 至 6 小时的授课。具体每一节或一章所需要的时间取决于学生的基础背景。大部分章后面都附有习题,对采用本教材的授课教师可以提供习题答案。本书 URL 的网址是

[www.wiley.com/college/Uyemura](http://www.wiley.com/college/Uyemura)

在本书中有些章的内容强调实际设计和版图设计,很难给出“家庭作业”式的习题。建议这些内容最好作为设计项目。

各专题的顺序安排按由下向上的设计层次介绍概念(第 1 和第 2 部分),然后进入第 3 部分的系统层。这比较适合于电气工程和硬件方向的计算机工程的学生。对于面向系统的设计课程,从第 10 章的 Verilog 讨论开始可能会觉得更自然些。这样可以强调高层次的系统设计和抽象,而把物理设计和电子电路作为实现的基础,使本教材更适合于计算机科学和面向系统的计算机工程专业。

围绕这本书已经制定了几种课程教学大纲。这里列出高年级一学期课程的三种安排,每种都给出按章讲授顺序的建议。根据学生的基础和授课教师的兴趣可做必要的改动。第 1 部分应当按顺序讲授,其中第 3 至第 5 章可以进行得较快。第 2 部分由于是电子电路的内容需要较多的时间。其中第 6 和第 7 章对本书其余部分比较重要;第 8 和第 9 章侧重于高级电子

电路设计,可供选用。第3部分的内容比较多样。第10章关于 Verilog 的内容可以用3至4课时讲完。其余各章侧重于专门的内容,不必按顺序进行。第14和第15章在系统设计课程中应当包括。

一般介绍	系统课程	电路专长
第一部分	第三部分	第一部分
第2~5章	第10,15章	第2~5章
第二部分	第一部分	第二部分
第6~8章	第2~5章	第6~9章
第三部分	第二部分	第三部分
第10,11,14~15章	第6,7章	第12~15章
	第三部分	
	第14,16章	

## CAD 工具

对 CAD 工具做了一般的讨论,而没有去讨论具体的工具。所以应当注意本书所附带的 CD 盘,它包括具有有限功能版本的 AIM-SPICE 和 MiroCap6 SPICE 电路分析程序,以及 Silos III Verilog 仿真器。这些可使许多 PC 用户亲身体验电路模拟和 Verilog 编码。CD 盘当前的内容列在一个叫 README.TET 的文件中,文件中包含装载提示。

## 设计项目

设计一个项目是在课堂环境中学习 VLSI 的良好手段。在 Georgia Tech 大学最初的实验安排是有关版图,DRC,参数提取和电路模拟。这些被存放在库中,以便最后在设计规模较大的芯片时使用。由于工艺的快速发展,设计说明要求每年都要改变。

设计项目本身总是按小组完成的,每个组由5到20个学生组成,设计项目由教师布置。做过的一些项目有基本的微处理器,MIMD 阵列处理器,通信接口,流水线数据通路,以及 DSP 电路。

项目的布置只包含一个系统层次的说明,细节完全留给学生工程小组来完成。他们必须建立一个高层次的 HDL 模型,用以转换为下层的行为、逻辑、电路和版图。他们拥有完整的 CAD 工具包,但没有综合工具。这使小组只能去使用他们在早期实验作业中设计的单元库。设计项目的意图是尽可能向学生展示 VLSI 的各个方面。

## 致谢

John Wiley & Sons 公司的 Mark Berrafato 和 Charity Robey 在本书著作的早期给予我许多启示。我的编辑 Bill Zobrist 从未对我将最终完成此书失去过信心。甚至在他第一个孩子 Ian 出生之后仍然继续他的支持,这多少要在他的家庭和他的工作之间合理分配一下时间! Jenny Welter 和 Susannah Barr 没有忘记每个细节,无论大的还是小的,使本书的出版得以顺利进行。Maddy Lesure 除为本书设计封面之外还帮助我解决图表问题,使之看起来更好。最后我要向我的出版编辑 Christin Cervoni 致敬,她为协调本书的出版做了大量的工作,检查了每个细节!

几位审稿人对本书最后的完成提出有益的建议。在此特别要感谢 Krishnendu chakrabarty(Duke 大学), Mona Zaghloul(George Washington 大学), Ralph Teeing-Cummings (The Johns Hopkins 大学)以及 Giovanni De Micheli (Stanford 大学)各位教授。我还要感谢 Georgia Tech 大学在过去几年中上过我芯片设计课的数百名 ECE 学生。他们在设计项目上所花费的无数时间使我了解到授课的内容怎样才能更好地转化为实际的应用。他们对课程和讲义稿的反馈意见极大地帮助了我的再次修改。尤其是 Michael Robinson 特别仔细地阅读了几章。Tony Alvarez (Cypress Semiconductor 半导体公司)和 Brian Butka (IDT 公司)设法为本书提供了几幅芯片照片。

在此,我还要感谢 Georgia Tech 电学与计算机工程学院院长 Roger Webb 博士对我写这本书的一贯支持。Bill Sayle 和 Joe Hughes 教授总是设法满足我的教学要求,使我能够得到涉足 VLSI 的机会。与 John Buck 和 Glenn Smith 教授的交谈总能给我们动力和启迪。

最后,我要再次感谢我的夫人 Melba 和我的女儿 Christine 和 Valerie,感谢她们对我的这项(以及所有的)工作的无限耐心和支持。虽然我不能够回报给她们我在写这本书上所花费的时间,也许去法国做一次短期旅行可以有所补偿。

再见!

John P. Uyemura

Atlanta, GA

2001 年 4 月

# 目 录

第 1 章 VLSI 概论 .....	1
1.1 复杂性与设计 .....	1
1.1.1 设计流程举例 .....	3
1.1.2 VLSI 芯片的类型 .....	5
1.2 基本概念 .....	5
1.3 本书安排 .....	7
1.4 参考资料 .....	8

## 第 1 部分 硅片逻辑

第 2 章 MOSFET 逻辑设计 .....	13
2.1 理想开关与布尔运算 .....	13
2.2 MOSFET 开关 .....	17
2.3 基本的 CMOS 逻辑门 .....	23
2.3.1 非门(NOT 门) .....	24
2.3.2 CMOS 或非门(NOR 门) .....	25
2.3.3 CMOS 与非门(NAND 门) .....	28
2.4 CMOS 复合逻辑门 .....	30
2.4.1 结构化逻辑设计 .....	32
2.4.2 异或门(XOR)和异或非门(XNOR) .....	40
2.4.3 一般化的 AOI 和 OAI 逻辑门 .....	41
2.5 传输门(TG)电路 .....	42
逻辑设计 .....	43
2.6 时钟控制和数据流控制 .....	45
2.7 参考资料 .....	48
2.8 习题 .....	48
第 3 章 CMOS 集成电路的物理结构 .....	51
3.1 集成电路工艺层 .....	51
互连线的电阻和电容 .....	53
3.2 MOSFET .....	56
3.2.1 硅的导电性 .....	58
3.2.2 nFET 和 pFET .....	62
3.2.3 FET 中的电流 .....	63
3.2.4 栅电容的驱动 .....	67

3.3	CMOS 工艺层 .....	69
3.4	FET 阵列设计 .....	71
3.4.1	基本门设计 .....	73
3.4.2	复合逻辑门 .....	76
3.4.3	一般性讨论 .....	78
3.4.4	小结 .....	81
3.5	参考资料 .....	81
3.6	习题 .....	82
<b>第 4 章</b>	<b>CMOS 集成电路的制造 .....</b>	<b>85</b>
4.1	硅工艺概述 .....	85
	本章概要 .....	87
4.2	材料生长与淀积 .....	88
4.2.1	二氧化硅 .....	88
4.2.2	氮化硅 .....	89
4.2.3	多晶硅 .....	90
4.2.4	金属化 .....	90
4.2.5	掺杂硅层 .....	91
4.2.6	化学机械抛光 .....	92
4.3	刻蚀 .....	93
	洁净间 .....	97
4.4	CMOS 工艺流程 .....	97
	工艺改进 .....	101
4.5	设计规则 .....	104
4.5.1	物理极限 .....	107
4.5.2	电气规则 .....	108
4.6	参考资料 .....	108
<b>第 5 章</b>	<b>物理设计的基本要素 .....</b>	<b>109</b>
5.1	基本概念 .....	109
	CAD 工具 .....	110
5.2	基本结构的版图 .....	111
5.2.1	n 阱 .....	111
5.2.2	有源区 .....	112
5.2.3	掺杂硅区 .....	113
5.2.4	MOSFET .....	114
5.2.5	有源区接触 .....	117
5.2.6	金属层 1 .....	118
5.2.7	通孔和多层金属 .....	121
5.2.8	防止门锁现象 .....	121
5.2.9	版图编辑器 .....	123
5.3	单元概念 .....	124
5.4	FET 的尺寸确定和单位晶体管 .....	129

5.5	逻辑门的物理设计 .....	133
5.5.1	NOT 单元 .....	134
5.5.2	与非门(NAND)和或非门(NOR)单元 .....	135
5.5.3	复合逻辑门 .....	136
5.5.4	关于版图的小结 .....	136
5.6	设计层次化 .....	137
5.7	参考资料 .....	139

## 第 2 部分 从逻辑到电子电路

第 6 章	MOSFET 的电气特性 .....	143
6.1	MOS 物理学 .....	143
	阈值电压的推导 .....	146
6.2	nFET 电流-电压方程 .....	147
6.2.1	SPICE Level 1 方程 .....	153
6.2.2	体偏置效应 .....	153
6.2.3	电流方程推导 .....	154
6.3	nFET 的 RC 模型 .....	157
6.3.1	漏源 FET 电阻 .....	157
6.3.2	FET 电容 .....	159
6.3.3	模型建立 .....	163
6.4	pFET 特性 .....	165
	pFET 寄生参数 .....	168
6.5	小尺寸 MOSFET 模型 .....	169
6.5.1	尺寸缩小原理 .....	169
6.5.2	小尺寸器件效应 .....	171
6.5.3	SPICE 模型 .....	172
6.6	参考资料 .....	173
6.7	习题 .....	174
第 7 章	CMOS 逻辑门电子学分析 .....	176
7.1	CMOS 反相器的直流特性 .....	176
7.2	反相器的开关特性 .....	181
7.2.1	下降时间计算 .....	185
7.2.2	上升时间 .....	186
7.2.3	传播延时 .....	188
7.2.4	一般分析 .....	189
7.2.5	反相器电路小结 .....	191
7.3	功耗 .....	191
7.4	DC 特性:与非门(NAND 门)和或非门(NOR 门) .....	193
7.4.1	与非门(NAND 门)分析 .....	193
7.4.2	或非门(NOR 门) .....	196
7.5	与非门和或非门的暂态响应 .....	197

7.5.1	NAND2 开关时间	198
7.5.2	二输入或非门(NOR2)的开关时间	200
7.5.3	小结	202
7.6	复合逻辑门的分析	202
	功耗	204
7.7	逻辑门过渡特性设计	205
7.8	传输门和传输管	208
7.9	关于 SPICE 模拟	211
7.10	参考资料	213
7.11	习题	214
<b>第 8 章</b>	<b>高速 CMOS 逻辑电路设计</b>	<b>217</b>
8.1	门延时	217
8.2	驱动大电容负载	224
	在反相器链中使延时最小	226
8.3	逻辑努力(Logical Effort)	231
8.3.1	基本定义	231
8.3.2	一般化情形	235
8.3.3	级数的优化	239
8.3.4	逻辑面积	240
8.3.5	分支情况	241
8.3.6	小结	242
8.4	BiCMOS 驱动器	242
8.4.1	双极型管的特性	243
8.4.2	驱动电路	246
8.5	参考资料	248
8.6	习题	249
<b>第 9 章</b>	<b>CMOS 逻辑电路的高级技术</b>	<b>251</b>
9.1	镜像电路	251
9.2	准 nMOS 电路	253
9.3	三态电路	255
9.4	时钟控制 CMOS	256
9.5	动态 CMOS 逻辑电路	261
9.5.1	多米诺逻辑	263
9.5.2	动态逻辑电路的功耗	266
9.6	双轨逻辑电路	266
9.6.1	CVSL	267
9.6.2	互补传输管逻辑	269
9.7	参考资料	270
9.8	习题	270



### 第 3 部分 VLSI 系统设计

第 10 章 用 Verilog <sup>®</sup> 硬件描述语言描述系统 .....	275
10.1 基本概念 .....	275
10.2 结构化的门级模型 .....	276
Verilog 举例 .....	276
10.3 开关级建模 .....	284
10.4 层次化设计 .....	288
10.5 行为级和 RTL 建模 .....	291
10.6 参考资料 .....	297
10.7 习题 .....	298
第 11 章 常用的 VLSI 系统部件 .....	300
11.1 多路选择器 .....	300
11.2 二进制译码器 .....	305
11.3 相等检测器和比较器 .....	307
11.4 优先权编码器 .....	310
11.5 移位和循环操作 .....	313
11.6 锁存器 .....	316
11.7 D 触发器 .....	321
11.8 寄存器 .....	326
11.9 综合的作用 .....	327
11.10 参考资料 .....	328
11.11 习题 .....	329
第 12 章 CMOS VLSI 运算电路 .....	330
12.1 一位加法器电路 .....	330
12.2 串行进位加法器 .....	335
12.3 超前进位加法器 .....	338
12.3.1 曼彻斯特进位链 .....	343
12.3.2 扩展为宽位加法器 .....	345
12.4 其他高速加法器 .....	348
12.4.1 进位旁路电路(Carry-Skip Circuits) .....	348
12.4.2 进位选择加法器(Carry-Select Adder) .....	349
12.4.3 进位保留加法器(Carry-Save Adder) .....	350
12.5 乘法器 .....	351
12.5.1 阵列乘法器 .....	353
12.5.2 其他乘法器 .....	355
12.6 小结 .....	358
12.7 参考资料 .....	358
12.8 习题 .....	359

第 13 章 存储器与可编程逻辑 .....	360
13.1 静态 RAM .....	360
13.2 SRAM 阵列 .....	364
13.3 动态 RAM .....	372
13.3.1 DRAM 单元的物理设计 .....	375
13.3.2 分割字线结构 .....	376
13.4 ROM 阵列 .....	377
用户编程 ROM .....	379
13.5 逻辑阵列 .....	382
13.5.1 可编程逻辑阵列 .....	382
13.5.2 门阵列 .....	385
13.6 参考资料 .....	386
13.7 习题 .....	387
第 14 章 系统级物理设计 .....	390
14.1 大规模集成电路的物理设计 .....	390
14.2 互连线延时模型 .....	391
14.2.1 信号延时与连线长度的关系 .....	398
14.2.2 对互连线延时的考虑 .....	399
14.3 串扰 .....	399
有关串扰的考虑 .....	403
14.4 互连线的尺寸缩小 .....	404
14.5 布局布线 .....	406
14.6 输入和输出电路 .....	410
14.6.1 输入电路 .....	410
14.6.2 输出驱动器 .....	414
14.7 电源的分配和功耗 .....	416
同时切换引起的噪声 .....	418
14.8 低功耗设计考虑 .....	421
14.9 参考资料 .....	422
14.10 习题 .....	423
第 15 章 VLSI 时钟和系统设计 .....	426
15.1 时钟控制触发器 .....	426
经典的状态机 .....	427
15.2 CMOS 时钟方式 .....	429
15.2.1 钟控逻辑链 .....	429
15.2.2 动态逻辑链 .....	437
15.3 流水线系统 .....	439
15.4 时钟的产生和分配 .....	443
15.4.1 时钟的稳定和产生 .....	444
15.4.2 时钟布线与驱动器树结构 .....	446