



电子信息学科基础课程系列教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材



集成电路设计 (第2版)

叶以正 来逢昌 主编

肖立伊 王进祥 主审

清华大学出版社





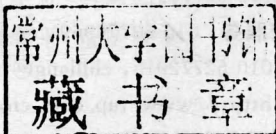
电子信息学科基础课程系列教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材



集成电路设计 (第2版)

叶以正 来逢昌 主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书比较全面深入地介绍了集成电路分析与设计的基础知识以及一些新技术的发展。其中,第1~4章介绍集成电路的发展、基本制造工艺、常用器件的结构及其寄生效应、版图设计基础知识、器件模型及SPICE模拟程序;第5~7章介绍双极型和CMOS型两大类数字集成电路和模拟集成电路基本单元分析与设计方法及其版图设计特点;第8~10章介绍数字集成电路自动化设计技术、测试技术、SoC/IP设计与验证技术及其发展趋势。

本书可以作为高等院校电子信息类本科生教材,也可作为相关领域研究生及工程师的参考用书。

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

集成电路设计/叶以正,来逢昌主编.--2版.--北京:清华大学出版社,2016

电子信息学科基础课程系列教材

ISBN 978-7-302-44718-4

I. ①集… II. ①叶… ②来… III. ①集成电路—电路设计—高等学校—教材 IV. ①TN402

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第185419号

责任编辑:文 怡

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 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

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市少明印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:29.25 字 数:656千字

版 次:2011年5月第1版 2016年9月第2版 印 次:2016年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00元

产品编号:071291-01

《电子信息学科基础课程系列教材》

编审委员会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)

王小海(浙江大学)

王 萍(天津大学)

刘宗行(重庆大学)

刘新元(北京大学)

张晓林(北京航空航天大学)

陈后金(北京交通大学)

郭宝龙(西安电子科技大学)

高上凯(清华大学)

徐淑华(青岛大学)

崔 翔(华北电力大学)

董在望(清华大学)

蒋宗礼(北京工业大学)

邓建国(西安交通大学)

王诗宓(清华大学)

王福昌(华中科技大学)

刘润华(中国石油大学)

张 石(东北大学)

沈连丰(东南大学)

郑宝玉(南京邮电大学)

柯亨玉(武汉大学)

高小榕(清华大学)

袁建生(清华大学)

傅丰林(西安电子科技大学)

曾孝平(重庆大学)

《电子信息学科基础课程系列教材》

丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和研究,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

(1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。

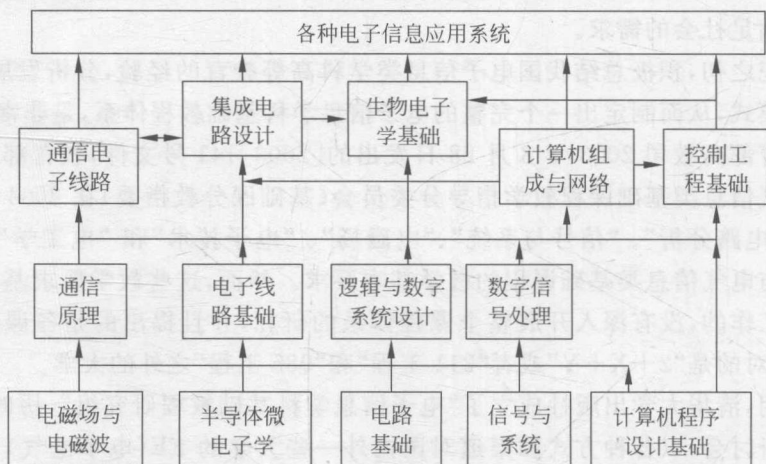
(2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。

(3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 电子科学与技术
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

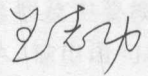
我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容

和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

前言

本书比较全面深入地介绍了集成电路分析与设计的基础知识以及一些新技术的发展,可以作为高等院校电子信息类专业本科生教材,也可作为相关领域研究生及工程师的参考用书。

本书的编写架构由主编叶以正、来逢昌组织编写人员讨论拟定,全书共分10章。第1章绪论,主要内容包括:集成电路的诞生、发展和分类,集成电路产业链及EDA技术发展概况;第2章集成电路工程基础,主要内容包括:集成电路基本制造工艺、集成电路中常用器件的结构及其寄生效应、集成电路版图设计基础知识;第3章集成电路器件模型,主要内容包括:二极管、双极型晶体管和MOS场效应晶体管的各种模型及主要模型参数;第4章SPICE模拟程序,主要内容包括:SPICE模拟程序各种输入/输出语句格式、电路分析功能和举例;第5章双极型数字集成电路,主要内容包括:TTL集成电路各种单元电路、单管逻辑门电路、ECL和I²L电路的分析、设计及其版图设计特点;第6章CMOS数字集成电路设计,主要内容包括:CMOS反相器、传输门、标准CMOS静态逻辑、伪NMOS逻辑与差分级联电压开关逻辑、传输门逻辑与差动传输管逻辑、CMOS动态逻辑、触发器、加法器、存储器等电路的分析与设计,以及CMOS集成电路版图设计特点和实现方法;第7章模拟集成电路设计,主要内容包括:电流镜电路、电流和电压基准源电路、单级及差分放大器电路、比较器电路、开关电容电路、DAC和ADC电路的工作原理和主要特性的分析与设计,以及模拟集成电路版图设计特点;第8章数字集成电路自动化设计,主要内容包括:数字集成电路自动化设计方法和流程、行为建模与Verilog硬件描述语言、设计综合技术和设计验证技术;第9章集成电路的测试技术,主要内容包括:故障模型、测试向量生成、可测性设计、系统芯片的测试结构及标准;第10章SoC设计概论,主要内容包括:SoC简介及SoC设计方法学、IP核的设计与复用技术、SoC/IP验证技术、基于片上网络互联的多核SoC以及SoC技术发展趋势。

编写分工为:叶以正编写第1、10章,来逢昌编写第2、5、6章,高志强编写第3、4章,王永生编写第7、9章,李晓明编写第8章。参加编写的人员还有:兰慕杰、罗敏、曹贝、付方发和周彬。喻明艳为教材架构的拟定提出了宝贵意见,全书由来逢昌整理、编辑成稿,由肖立伊和王进祥主审。

编写本书希望能够覆盖集成电路设计的基础知识并跟踪集成电路新技术的发展,但由于集成电路涉及的技术广泛、发展迅速,书中难免存在疏漏和错误,恳切希望广大读者批评指正。

编者

2016年6月

第 1 章 绪论	1
1.1 集成电路的诞生和发展	2
1.2 集成电路分类	4
1.3 集成电路产业链	7
1.4 集成电路设计与 EDA 技术.....	8
1.4.1 集成电路设计	8
1.4.2 集成电路设计自动化技术的发展	9
第 2 章 集成电路工程基础	11
2.1 平面工艺基础	12
2.1.1 薄膜的制备	12
2.1.2 光刻工艺和技术	16
2.1.3 掺杂技术	18
2.2 集成电路制造基本工艺流程	20
2.2.1 双极型集成电路制造工艺流程	20
2.2.2 CMOS 集成电路制造工艺流程	24
2.2.3 Bi-CMOS 集成电路制造工艺简介	28
2.3 集成电路中的元件	29
2.3.1 NPN 晶体管及其寄生效应	29
2.3.2 PNP 晶体管及其寄生效应	36
2.3.3 MOS 晶体管及其寄生效应	39
2.3.4 小尺寸 MOS 器件凸显的问题与按比例缩小理论	43
2.3.5 集成电路中的二极管	48
2.3.6 集成电路中的电阻器	51
2.3.7 集成电路中的电容器	56
2.3.8 集成电路中的电感器	59
2.4 集成电路版图设计基础	60
2.4.1 版图设计规则	60
2.4.2 版图布局	63

目录

2.4.3	版图布线	67
2.4.4	版图验证与数据提交	67
2.4.5	版图基本优化设计技术	69
第3章	集成电路器件模型	74
3.1	二极管模型	75
3.1.1	直流模型	75
3.1.2	大信号模型	76
3.1.3	小信号模型	76
3.1.4	PN结二极管温度效应	77
3.2	双极型晶体管模型	78
3.2.1	EM模型	78
3.2.2	GP模型	81
3.3	MOS场效应晶体管模型	85
3.3.1	MOSFET电流方程模型	86
3.3.2	MOSFET大信号模型	87
3.3.3	MOSFET小信号模型	89
3.3.4	MOSFET二阶及高阶效应模型	91
3.4	噪声模型	101
3.4.1	噪声源类型	101
3.4.2	集成电路器件噪声模型	104
第4章	SPICE模拟程序	108
4.1	SPICE简介	109
4.2	SPICE电路描述语句	109
4.2.1	电路输入语句和格式	109
4.2.2	SPICE的输出语句和输出变量	117
4.3	SPICE电路分析功能介绍	119
4.3.1	直流分析	119
4.3.2	交流小信号分析	126
4.3.3	瞬态分析	131

4.3.4	傅里叶分析	132
4.3.5	通用参数扫描分析	133
4.3.6	蒙特卡罗分析	133
4.3.7	最坏情况分析	136
4.3.8	温度分析	136
4.3.9	噪声分析	137
4.3.10	其他常用的控制命令	138
第 5 章	双极型数字集成电路	141
5.1	简易 TTL 与非门	142
5.1.1	工作原理	142
5.1.2	电压传输特性与抗干扰能力	142
5.1.3	负载能力	143
5.1.4	瞬态特性	144
5.1.5	电路功耗	144
5.1.6	多发射极输入晶体管设计	145
5.2	TTL 与非门的改进形式	146
5.2.1	三管单元 TTL 与非门	146
5.2.2	四管单元 TTL 与非门	146
5.2.3	五管单元 TTL 与非门	147
5.2.4	六管单元 TTL 与非门	147
5.2.5	肖特基晶体管和 STTL 与非门	149
5.2.6	LSTTL 和 ALSTTL 与非门	151
5.3	TTL 与非门的逻辑扩展	152
5.3.1	TTL 基本门电路	153
5.3.2	TTL OC 门电路	156
5.3.3	TTL 三态门电路	158
5.3.4	TTL 施密特逻辑门电路	158
5.3.5	TTL 触发器电路	160
5.4	TTL 中大规模集成电路	163
5.4.1	中大规模集成电路的结构特点	163

目录

5.4.2	TTL 简化逻辑门	164
5.4.3	单管逻辑门电路	166
5.4.4	内部简化触发器	169
5.5	TTL 集成电路版图解析	171
5.5.1	TTL 与非门版图解析	171
5.5.2	LSTTL 或门版图解析	173
5.6	ECL 集成电路	174
5.6.1	ECL 基本门的工作原理	175
5.6.2	ECL 电路的逻辑扩展	177
5.6.3	ECL 电路版图设计特点	178
5.7	I ² L 集成电路	178
5.7.1	I ² L 基本单元的工作原理	179
5.7.2	I ² L 电路的逻辑组合	180
5.7.3	I ² L 电路版图设计特点	180
第 6 章	CMOS 数字集成电路设计	182
6.1	CMOS 反相器	183
6.1.1	工作原理	183
6.1.2	直流传输特性与噪声容限	184
6.1.3	瞬态特性	186
6.1.4	功耗特性	188
6.2	传输门	190
6.2.1	单沟 MOS 传输门	190
6.2.2	CMOS 传输门	191
6.3	CMOS 基本逻辑电路	192
6.3.1	标准 CMOS 静态逻辑门	192
6.3.2	伪 NMOS 逻辑与差分级联电压开关逻辑	198
6.3.3	CMOS 三态门	200
6.3.4	传输门逻辑和差动传输管逻辑	201
6.3.5	CMOS 动态逻辑	204
6.4	CMOS 触发器	209

6.4.1	R-S 触发器	209
6.4.2	D 触发器	211
6.4.3	CMOS 施密特触发器	216
6.5	加法器电路	218
6.5.1	全加器和半加器	218
6.5.2	逐位进位加法器	222
6.5.3	进位选择加法器	222
6.5.4	超前进位加法器	224
6.6	MOS 存储器	225
6.6.1	存储器概述	225
6.6.2	MASK ROM	227
6.6.3	可擦写 ROM	235
6.6.4	随机存取存储器	238
6.6.5	按内容寻址存储器	245
6.7	CMOS 集成电路版图设计特点	249
6.7.1	抗闩锁设计	249
6.7.2	抗静电设计	250
6.8	集成电路实现方法	253
6.8.1	全定制设计方法	253
6.8.2	门阵列设计方法	254
6.8.3	标准单元设计方法	255
6.8.4	积木块设计方法	258
6.8.5	可编程逻辑器件方法	258
第 7 章	模拟集成电路设计	261
7.1	概述	262
7.2	电流镜	263
7.2.1	基本 MOS 电流镜	263
7.2.2	共源共栅电流镜	264
7.2.3	双极型电流镜	267
7.3	基准源	268

目录

7.3.1	电压基准源	269
7.3.2	电流基准源	273
7.4	CMOS单级放大器	276
7.4.1	共源极放大器	276
7.4.2	共漏极放大器	277
7.4.3	共栅极放大器	278
7.4.4	共源共栅极放大器	280
7.4.5	四种典型结构的特点归纳	282
7.5	双极型单级放大器	283
7.5.1	共射极放大器	283
7.5.2	共集极放大器	284
7.5.3	共基极放大器	285
7.6	差动放大器	286
7.6.1	差动工作方式	286
7.6.2	基本差动对	287
7.6.3	共模响应	289
7.7	放大器的频率特性	290
7.7.1	密勒效应	290
7.7.2	共源极的频率特性	291
7.7.3	共漏极的频率特性	292
7.7.4	共栅极的频率特性	293
7.7.5	共源共栅极的频率特性	294
7.7.6	差动放大器的频率特性	294
7.8	噪声	295
7.8.1	噪声有关特性	295
7.8.2	电路中的噪声计算	296
7.9	运算放大器及频率补偿	298
7.9.1	性能参数	298
7.9.2	一级运放	301
7.9.3	两级运放	304
7.9.4	反馈及频率补偿	305

7.10	比较器	310
7.10.1	比较器的特性	310
7.10.2	比较器的类型	312
7.10.3	高速比较器的设计	314
7.11	开关电容电路	315
7.11.1	基本开关电容	315
7.11.2	基本单元	316
7.11.3	开关电容滤波器	318
7.12	数据转换电路	319
7.12.1	数模转换器	320
7.12.2	模数转换器	327
7.13	模拟电路的版图设计特点	340
7.13.1	晶体管	340
7.13.2	对称性	340
7.13.3	无源器件	341
7.13.4	噪声问题	342
第 8 章	数字集成电路自动化设计	345
8.1	数字集成电路设计方法学概述	346
8.1.1	层次化设计方法	346
8.1.2	电子设计自动化设计流程	348
8.2	Verilog 硬件描述语言	351
8.2.1	Verilog HDL 基础	351
8.2.2	Verilog HDL 门级建模	356
8.2.3	Verilog HDL 数据流建模	358
8.2.4	Verilog HDL 行为级建模	362
8.2.5	Verilog HDL 层次式建模	369
8.3	设计综合	373
8.3.1	行为综合	373
8.3.2	逻辑综合	374
8.3.3	版图综合	378

目录

8.4	设计验证	381
8.4.1	设计验证的基本内容	381
8.4.2	功能验证概述	382
8.4.3	基于模拟的验证	385
8.4.4	时序验证概述	392
第9章	集成电路的测试技术	393
9.1	故障模型	394
9.1.1	固定型故障	394
9.1.2	桥接故障	396
9.1.3	延迟故障	396
9.1.4	I_{DDQ} 故障	397
9.2	测试向量生成	397
9.2.1	异或法	398
9.2.2	布尔差分法	398
9.2.3	单路径敏化法	399
9.2.4	D算法	399
9.2.5	FAN算法	403
9.3	可测性设计	403
9.3.1	专用可测性设计技术	404
9.3.2	扫描测试技术	404
9.3.3	内建自测试技术	406
9.3.4	边界扫描技术	408
9.4	系统芯片的测试结构及标准	412
9.4.1	SoC测试结构	412
9.4.2	内核测试标准 IEEE 1500	414
第10章	SoC设计概论	418
10.1	SoC简介	419
10.1.1	SoC概述	419
10.1.2	SoC结构	419

10.1.3	SoC 的技术特点	421
10.2	SoC 设计方法学	421
10.2.1	SoC 设计流程	421
10.2.2	基于平台的 SoC 设计方法	422
10.2.3	SoC 设计自动化技术的发展	424
10.3	IP 核的设计和复用	425
10.3.1	IP 核的几种形态	425
10.3.2	IP 核设计和复用技术	425
10.4	SoC/IP 验证技术	428
10.4.1	SoC 验证的特点	428
10.4.2	SoC 验证方法学	429
10.5	基于片上网络互连的多核 SoC	435
10.5.1	MPSoC 简介	435
10.5.2	MPSoC 片上通信结构的发展	435
10.5.3	片上网络技术	437
10.6	SoC 技术的发展	438
10.6.1	SoC 技术发展趋势	438
10.6.2	纳米工艺制程中 CMOS 器件技术的发展	440
10.6.3	纳米级集成电路材料和工艺设备的发展	444
参考文献		445