

D.A. 帕克内尔 W. 埃什拉吉安 著

超大规模集成电路 设计基础

系统与电路

微电子学系列

科学出版社

73.7551

340

超大规模集成电路设计基础

系统与电路

D. A. 帕克内尔 著

K. 埃什拉吉安

王正华 沈晓民 译

党晓颖 王丙丰

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书将 nMOS 技术与 CMOS 技术融为一体,系统地介绍了 MOS 数字大规模集成电路、子系统、系统的设计方法,并给出了设计实例。全书共十四章,可分为两部分。第一至七章介绍与设计有关的基础知识;第八至第十三章则以实用为背景,阐述了设计中的一些实际问题及设计规则,详细介绍了—个子系统的设计实例和三个 CMOS 设计实例。最后一章介绍了在超高速集成电路和系统中崭露头角的砷化镓集成电路的设计思想及设计技术。书末附录给出了两个可供设计人员借鉴的设计规则。

本书是一本教材,实用性强,叙述深入浅出。读者不需具备较深的电子工程学和半导体物理学的专门知识,即可直接进入本书的学习。因而本书既可作为计算机、电子工程或微电子专业大学生的教学用书或教学参考书,也可供微电子学、计算机领域里的广大科技人员及应用微电子技术的广大工程技术人员阅读。

D. A. Pucknell K. Eshraghian

BASIC VLSI DESIGN

Systems and Circuits, 2nd ed.

Prentice Hall, 1988

Original English language edition published by

Prentice Hall of Australia Pty. Limited

Copyright © 1988 by Prentice Hall of Australia Pty. Limited

超大规模集成电路设计基础

系统与电路

D. A. 帕克内尔 著

K. 埃什拉吉安

王正华 沈晓民

党晓颖 王丙丰 译

责任编辑 魏 玲

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 5 月 第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1993 年 5 月 第 一 次 印 刷 印 张: 13 插 页: 8

印 数: 1—2 280 字 数: 335 000

ISBN 7-03-003327-2/TN·133

定 价: 18.50 元

3750180

中译本序言

20多年来微电子技术的迅猛发展不仅给电子工业,也给工农业生产和人民生活带来了巨大变化。大规模、超大规模集成电路,以其高超的性能、低廉的价格和优越的稳定性、可靠性在电子技术领域取得了垄断地位,并为电子技术的应用开辟了愈来愈多的新领地。特别是近年来发展起来的专用集成电路(ASIC),使绝大部分用分立器件和集成电路组装成的整机或系统被一块或几块专用集成电路所取代,这不仅降低了装配成本,提高了可靠性,还使整机的线路保密性得以加强,增加了仿制的难度,从而大大提高了整机的竞争能力。

随着专用集成电路的发展,大规模、超大规模集成电路的设计工作已经跨出集成电路制造厂的大门,步入了广大线路与整机设计人员的办公室,引起了电子工作者的普遍关注。《超大规模集成电路设计基础》一书正是在这种情况下问世的。该书以MOS超大规模数字集成电路为设计对象,从基本原理起步,因而读者不需要有专门的学习背景,该书注重实际应用,实例丰富,并有练习辅助,对初学者更为有益。书末附有两家公司实际使用的设计规则,这对实际设计是很有用的。相信该书的翻译出版,将能受到我国广大线路工作者的欢迎,在他们自己设计所需要的形形色色的专用集成电路时,会有所帮助。

王守党

1991年9月

前 言

25 年来,电子学发生的巨大变化是其它任何技术学科所无法比拟的。60 年代初,集成电路问世以后,电子学便以迅猛的速度向前发展。到目前为止,集成电路的发展经历了四个具有明显特点的阶段: 60 年代初的小规模集成电路 (SSI), 60 年代末的中规模集成电路 (MSI), 70 年代在大规模集成电路 (LSI) 应用方面取得的重大进展,现在超大规模集成电路 (VLSI) 已成为 80 年代的技术。

通用和专用的 VLSI 芯片(无论是市场销售的通用电路还是专门设计的专用电路)是工程师们设计系统的基本元件。VLSI 的复杂程度已经达到包含 5 万或更多个晶体管的水平。利用 VLSI 能够设计和实现的系统仅受到设计者想象力的限制,从工艺技术上已经可以使设计者的创造力无限发挥。

设计 VLSI 已成为专业工程师和计算机技术人员应该具备的日趋重要的技能(如果不是主要技能的话)。VLSI 的应用将会愈来愈广泛,对其设计的需求将会越过电子工程的界限,进入更广泛的技术领域。因此,其它技术领域的人们,广泛需要通过深入浅出、容易接受的方法了解 VLSI 技术。

VLSI 系统的微细线条为高速电路的设计提供了可能,并在高速数据处理系统中获得了广泛的应用。硅 MOS 电路虽然能满足这类系统的大部分要求,但由于电子(和空穴)在硅中的极限速度有一定的限制,使硅 MOS 电路不适于某些正在计划研制的超高速系统。因此人们正在努力研究采用其它技术,其中包括采用硅以外的其它材料生产集成电路。采用砷化镓 (GaAs) 材料生产超高速集成电路是一项具有广泛前景的新技术。

生产硅 VLSI 系统既采用硅 nMOS 工艺,也采用 CMOS 工

9310278

• iii •

艺。有必要同时掌握这两种工艺并在需要时采用其中的一种设计集成电路。这并不增加学习的负担,因为它们之间联系紧密,设计思想基本相似。另外,进一步也可以利用这些概念设计 GaAs 电路。

本书系统地讲授了数字 MOS (CMOS 和 nMOS) VLSI 的设计,并初步介绍了 GaAs 电路的设计思想。本书的主要内容可作为电子工程系和计算机工程系大学生的教材,也适合有实践经验的专业工作者自学或作为进修教材,还适合那些需要获得本学科基础知识的读者阅读。考虑到读者的基础不同,本书采用直接和简明的写法,读者可不必具备较深的电子工程学和半导体物理学知识。由于 VLSI 将在数字系统领域中获得广泛的应用,因此本书主要讨论的是数字电路和系统,而不是模拟电路和系统。

感谢 Mead, Conway 等人在 VLSI 设计方法学方面所作的具有远见而又实际的工作,使学习集成电路设计的基本原理变得非常容易,设计人员经过一段不太长时间的学习,便能达到设计 VLSI 的水平。这使设计者具备了能根据实际情况设计和使用专用处理器的能力,从而为设计者提供了更新颖、灵活有效的解决问题的手段。

本书是五年来对电子工程系大学生、有实践经验的工程师和计算机人员讲授 VLSI 系统设计的教学经验结晶。它和在 Adelaide 大学电子工程系讲授的教材紧密配合,书中所用的设计例子都曾做出硅片,得到了验证。

基本内容的讲授和辅导若每周 3 学时以上,则需九周;若每周 2 学时,则需半学年。但如果有应用 CAD 工具的实验课,则至少需要增加 12 学时。一个粗略的学时分配如下:

授课	16学时
辅导	10学时
实验课	12学时

应当指出,本书也可以作为四整天全天授课及辅导教材。

本书第一章至第十章介绍了 MOS 数字电路设计的基础知

识。其中第八章至第十章包括一个系统设计的例子，具体阐明本书的内容。第十三章还包括三个其它的设计项目。除第十三章的 CMOS 项目外，所有练习均采用以 λ 为基本单位的设计规则 (Mead 和 Conway 的方式)。本书还介绍了两个制造商的设计规则(是以微米为基本单位的)；一个是澳大利亚 AWA 有限公司的设计规则，另一个是美国加州 Orbit 半导体有限公司的设计规则，这是一种较新的 $2\mu\text{m}$ 双层金属布线 CMOS 工艺的设计规则。

本书第十一章有两个作用。一是设想从更实际的角度、更高的深度去复习前面章节所介绍的系统设计方法。二是作者把设计步骤和书中前面所制定的基本规则汇总在一起并对某些情况加以重点讨论，给读者提供既有价值又易于查阅的参考资料。

本书的辅导练习至少需要 10 学时(每次辅导至少 2 学时)。只参考本书的内容就能做书中的辅导练习，如果进行考核，辅导就会更富有成效。

实验室的工作需要 CAD 工具，第十二章介绍了一种 CAD 工具。它将为授课或在这个领域的进一步学习打下基础。通常在 12 学时实验课的前几学时里介绍第十二章的有关内容。但专门为电子工程系大学生授课时，第十二章的有关内容和对 MOS 制造工艺的进一步论述需要额外增加 9 学时。

如果有计算机设备和 CAD 工具，每个学生在计算机终端前用 10 到 12 学时(每次最好 2 学时而不是 1 学时)完成 MOS VLSI 设计的练习和设计项目将是非常有益的。

第十四章介绍了 GaAs 工艺，建立了棍图表示法和代表各工艺层的填充图符，并探讨了 GaAs 基本逻辑电路的形式。

书中用单色图表示的版图可以在单色图形终端上显示。书中提供的彩色轮廓图可以用多笔绘图机画出。这两种形式都可由通用的软件和普通的终端产生。书中采用单色填充图符表示棍图和版图，是便于教师用同样的格式复制。这种方法复制方便，不会像彩色棍图复制成单色棍图那样丢失层的信息(彩色复印件由于

价格昂贵和通用性差一般不采用)。

对于一直以本书第一版作为教材的人们来说,由于第一版中的所有主要内容都包括在本书中,并且章节顺序一致,内容大部分出现在同一章节,因此采用新版本,授课不会受很大的影响。

总之,作者设法提供一本内容适度、结构合理的教材来介绍 MOS 电路、子系统和系统的设计,并且把 nMOS 和 CMOS 技术融合在一起加以讨论。此外还用同样的方法介绍了 GaAs 电路的设计。本书的内容经过多年教学应用,是经得起推敲的,我们试图以深入浅出、易于吸收的方式讲述本书的内容。

D. A. 帕克内尔 K. 埃什拉吉安

1987 年 6 月于澳大利亚,阿德莱德

鸣谢

多数教科书都是根据一段时间的教学实践,经过许多人的共同努力编著而成的。在这方面,《超大规模集成电路设计基础》也不例外。本书作者们曾从各种讨论、评论,各种建设性意见,以及许多同事、研究人员、研究生和大学生提供的各种形式的直接帮助中获益匪浅。我们曾有幸得到许多精明强干的组织及个人的协助,要把所有作出过贡献的团体和个人都一一道出是不可能的,但我们将尽量把一些对我们的工作有直接帮助的有代表性的人们列举出来。

首先,我们必须感谢 Paltridge、Rosenberg 教授和 Trivedi 教授,他们均提供了非常有用的材料,他们的贡献可以分别在第四章、第十二章和第十一章中看到。

我们的超大规模集成电路(VLSI)科研教学活动,曾大大地受益于加州硅谷 Orbit 半导体公司的 Gray Kenneoly 所提供的帮助。在这本书里,采用了 Orbit 的 $2\mu\text{m}$ 设计规则。我们还要感

谢澳大利亚的 AWA 有限公司的 B. McChusky 和 V. Svoboda 的合作,他们提供了 AWA 的设计规则。

通过与北卡罗来纳州微电子中心 (MCNC) 的技术合作,使学校的研究活动和教学活动大大加强了。这项合作应归功于 MCNC 的 Calingaert 教授的远见。Jonathon Rosenberg 正在继续有效地进行这一任务,他也为本书提供了材料。

我们还非常感谢 Adelaide 大学,特别是电力与电子工程系。尽管学校财力紧张,他们仍然将学校资源引向微电子领域,一直到目前都是如此。这说明系主任 Don Griffin 和系副主任 Tong Parker 的足智多谋起了重大作用。我们十分感谢他们的帮助,同时还要感谢全系同仁的宽容与支持。其中 Peter 和 Michael 起的作用,值得特别一提。

如果没有渴望学习的学生的促进,就不可能有成功的教学。很幸运,我们有一批高质量的大学生和研究生,我们特别要感谢那些从我们课堂里得到专业知识并用来进行设计和试验的学生。

在教学领域,我们必须感谢 Craig Mudge 博士的首创精神,他在澳大利亚率先开展了“训练教师”的教学活动,并通过 CSIRO (联邦科技工业研究组织) 为开展 AUSMPC (澳大利亚 Multi-Project Chip) 活动,提供了芯片加工渠道。几年来,我们大大地受益于和 Adelaide 的硅集成电路设计有限公司 (Integrated Silicon Design Pty Ltd) 的合作。该公司曾在世界各地定期举办 VLSI 讲座。我们要特别提到 Laird, Alf 和 Greg 对我们的支持和帮助。

我们的国际合作教学活动得到了新加坡 ARC (Applied Research Corporation) 的合作和支持,最近又得到了伦敦 Middlesex 技术学院微电子中心 (MCMP) 的合作和支持。

在迅速发展的领域,如 VLSI 设计,研究与教学是紧密联系在一起。这种情况使得教学更为有效,因为某些教学内容直接来自研究生及年青工程师的工作。这里我们曾大大地受惠于一些有天赋、富于创造性、有能力的同事们的支持,其中 Alex Dickin-

son, Peter Evans, Paul Franzon, Peter Heath, Michall Pope 和 Roman Woloszczuk 付出了巨大的努力。

说到这本书的出书过程,我们必须感谢 Adelaide 大学电力与电子工程系的秘书人员,感谢 Parry 夫人为手稿的写作所提供的便利条件,我们还要感谢 Sandison 夫人和 Drake 夫人。

我们还非常感谢悉尼 Prentice-Hall 的全体编辑和出版人员,这里我们要特别提到 Ted, Richard 和 Ian, 他们保证了高质量地出版这本书。

最后,我们还要感谢我们各自的妻子 Ella 和 Deidre, 感谢她们的耐心与理解,没有她们的宽容与支持,这本书不知何年何月才能完成。

目 录

第一章 微电子学回顾及 MOS 技术概况	1
1.1 集成电路技术简介	1
1.2 集成电路时代	1
1.3 MOS 技术和 VLSI	2
1.4 基本 MOS 晶体管	5
1.5 增强型晶体管原理	8
1.6 耗尽型晶体管原理	9
1.7 nMOS 制造工艺	9
1.8 CMOS 工艺流程	13
1.9 工艺过程中的高温加工	19
1.10 电子束掩模的制作	20
1.11 小结	21
第二章 MOS 电路的基本电学特性	22
2.1 源-漏电流 I_{ds} 与电压 V_{ds} 的关系	22
2.2 阈值电压 V_t	26
2.3 晶体管跨导 g_m	28
2.4 品质因数 ω_0	29
2.5 传输晶体管	30
2.6 nMOS 反相器	30
2.7 nMOS 反相器驱动的 nMOS 反相器, 其上拉管与 下拉管电阻比率 ($Z_{p.u.}/Z_{p.d.}$) 的确定	33
2.8 通过一个或一个以上传输晶体管驱动的 nMOS 反 相器, 其上拉管与下拉管的电阻比率	35
2.9 上拉管的其它形式	38

2.10	CMOS 反相器	38
2.11	MOS 晶体管电路模型	43
2.12	CMOS 电路中的闩锁效应	44
2.13	练习	47
第三章	MOS 电路设计过程	48
3.1	MOS 器件的各层版图	48
3.2	棍图	48
3.3	设计规则和版图	54
3.4	关于设计规则的总说明	62
3.5	AWA OXCMOS 工艺介绍	65
3.6	双层金属、单层多晶硅、 $2\mu\text{m}$ CMOS 工艺	67
3.7	版图	68
3.8	练习	69
3.9	辅导练习 1	69
第四章	基本的集成电路概念	71
4.1	薄层电阻	71
4.2	MOS 晶体管和反相器中的薄层电阻	72
4.3	导电层的电容	75
4.4	电容的标准单位 $\square C_g$	76
4.5	某些层电容的计算方法	76
4.6	延迟单位 τ	78
4.7	反相器的延迟	80
4.8	超级缓冲器、HMOS 和天然晶体管	83
4.9	驱动大电容负载	88
4.10	传输延迟	90
4.11	连线的电容	92
4.12	导电层的选用	94
4.13	练习	96
第五章	子系统的线路设计和版图设计	99
5.1	系统设计方面的一些问题	99

5.2	开关逻辑	100
5.3	(可恢复完整信号的)逻辑门	102
5.4	结构式设计方法举例(关于组合逻辑线路的部分)	115
5.5	某些钟控时序电路	128
5.6	关于系统设计的其它问题	134
5.7	辅导练习 2	138
第六章	MOS 电路尺寸按比例缩小	141
6.1	比例因子 α	141
6.2	电路功能对电路尺寸按比例缩小的限制	143
6.3	关于连线和接触孔按比例缩小的问题	146
6.4	CMOS 电路按比例缩小后的闩锁效应	148
6.5	有关电路制造的一些问题	148
第七章	可编程逻辑阵列和有限状态机	150
7.1	关于组合逻辑电路的一些观念	150
7.2	简单组合逻辑电路的一些设计方案的比较	150
7.3	可编程逻辑阵列	154
7.4	有限状态机	158
7.5	辅导练习 3	167
第八章	系统设计	169
8.1	总体考虑	169
8.2	举例说明设计过程	171
8.3	关于设计过程的总结	181
第九章	继续举例说明设计过程	182
9.1	关于设计过程的评述	182
9.2	规整性 (regularity)	182
9.3	ALU 子系统的设计	183
9.4	超前进位加法器	197
9.5	并行乘法器	198
9.6	练习	202

9.7	辅导练习 4	202
第十章	存储器、寄存器和系统时序	204
10.1	关于系统的时序	204
10.2	常用的存储记忆单元	205
10.3	构造存储单元阵列	226
10.4	练习	236
10.5	辅导练习 5	236
第十一章	设计中的实际问题及设计的基本规则	240
11.1	电路性能上的问题	240
11.2	再谈版图规划及版图设计	249
11.3	四位处理器的版图设计	252
11.4	输入/输出 (I/O) 压焊块	252
11.5	芯片面积	256
11.6	系统延迟的进一步分析	258
11.7	成功的设计应遵守的基本规则	263
11.8	关于设计流程的最后附言	274
11.9	本章的专门参考文献	274
第十二章	与 VLSI 设计有关的其它问题	275
12.1	设计方式和设计原则	276
12.2	与制造厂的接口	278
12.3	用于设计和模拟的 CAD 工具	281
12.4	生产前的设计验证	301
12.5	测试和可测性	304
12.6	结论	313
第十三章	CMOS 设计实例	314
13.1	设计实例介绍	314
13.2	CMOS 设计实例 1——增/减量器	314
13.3	CMOS 设计实例 2——左/右、串/并移位寄 存器	321
13.4	CMOS 设计实例 3——两个 n 位数比较器	328

13.5	总结	338
第十四章	未来的高速 VLSI 电路和系统	340
14.1	亚微米 CMOS 工艺	340
14.2	砷化镓 VLSI 技术	341
14.3	砷化镓电路的设计方法	356
14.4	GaAs MESFET 以微米为单位的设计规则	360
14.5	器件模型与性能评估	363
14.6	GaAs 门逻辑电路系列	368
14.7	超高速逻辑 (VHSL) 电路的设计	371
14.8	VLSI 设计——决定性的因素	372
附录 A	AWA 设计规则	374
附录 B	Orbit 半导体公司设计规则	381
参考书目	398

第一章 微电子学回顾及 MOS 技术概况

1.1 集成电路技术简介

毫无疑问,电子工程技术对我们的日常生活产生着巨大的影响。在家庭生活中,在各个专业领域,在工作场所以及在娱乐活动中都是这样。甚至在学校里,学生们也在使用着相当复杂的各种电子设备和电子系统。在短短的时间内,电子技术使我们的周围发生了革命性的变化。我们相信,在未来的十年中,将会有更加惊人的发展。

当今电子学的特点意味着电子装置的可靠性高、功耗低、重量轻、体积小、成本低,并且容易构成高度精密和复杂的系统。电子学,特别是集成电路,使我们能够设计各种功能强大、灵活多变的处理器,这些处理器又为用户提供了既具有高度智能又具有较强适应性的设备。集成电路存储器是处理器的配套部件,它和大量的逻辑及模拟电路一起,为系统设计者提供了设计复杂系统的条件,使电子系统得到更广泛的应用。而且,这种技术上的飞速发展并未停止,进一步发展的潜力仍然十分可观。

直到 50 年代,在有源电子器件中真空管一直占统治地位,虽然也做过一些器件小型化和电路集成方面的工作,但这些技术进步并未达到我们今天能够接受的水平。当今电子学的飞速发展主要应归功于 1947 年发明的晶体管和 60 年代初发明的集成电路。

1.2 集成电路时代

集成电路的发展非常迅速,从 60 年代初至今已经历了四代的发展历程。现在,商品化集成电路的集成度已从 20 多年前的每片

2 只晶体管提高到每片 500 000 只晶体管。如此迅猛的增长速度早已被现在英特尔公司工作的 G. 摩尔 (Gorden Moore) 预见到了。图 1-1 为摩尔第一定律的图示。微电子技术发展的过程还可以扼要地归纳在表 1-1 中。

在半导体时代的初期,制造商们看重了锗器件。但很快,重点转向了硅。在硅衬底上人们开发出了集成电路 (IC)。集成电路也分两个方向发展,即双极技术和 MOS 技术。最初,双极技术似乎为高速逻辑阵列提供了最有前途的方法, MOS 技术则提供了较高的集成度。但最近的 MOS 电路也具备了高速工作的能力。

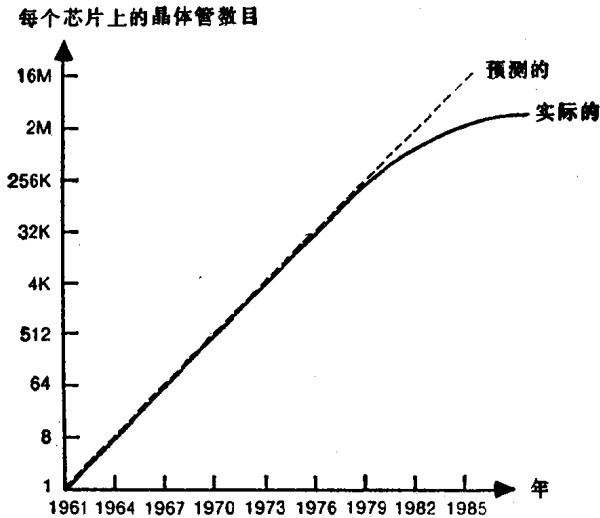


图 1-1 摩尔第一定律图示：一个芯片上集成的晶体管数目(商业化产品)

1.3 MOS 技术和 VLSI

MOS 技术,可分为以 pMOS、nMOS 和 CMOS 器件为基础的三个分支,它们各有特点,可分别应用于不同场合。pMOS 容易