

223531

超大规模集成电路系统导论

[美] C. 米德 L. 加威 著

科学出版社

超大规模集成电路系统导论

〔美〕C. 米德 L. 加威 著

何 诣 译

沈国雄 校

科 学 出 版 社

1 9 9 1

内 容 简 介

本书从系统设计的角度出发阐述了超大规模集成电路电子学与计算机科学相互结合向前发展的趋势。全书共九章。第一、二章介绍了 MOS 器件、电路及其制备基础；第三、四章介绍了系统设计基础及其实现方法；第五、六章给出了一个大规模集成电路系统设计实例；第七至九章分别介绍了系统定时、高并行系统及计算系统物理学。

本书可供从事集成电路及计算机系统设计的人员参考，也可作为高等学校电子工程系及计算机科学系的研究生或高年级学生的学习参考书。

本书一至四章由杨柳林译，五至九章由陆容译。许卓群、王阳元、夏武颖、张海藩及叶志权同志均为本书的翻译出版作了许多有益的工作。

Carver Mead, Lynn Conway
INTRODUCTION TO VLSI SYSTEMS
Addison-Wesley Publishing Company, 1980

超大规模集成电路系统导论

〔美〕C. 米德 L. 加威 著

何 诣 译

沈国雄 校

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

*

1986年3月第 一 版	开本：787×1092 1/32
1991年5月第二次印刷	印张：15 1/4 插页：8
印数：3 501— 3 950	字数：344 000

ISBN 7-03-002001-4/TN·93

定价：13.10元

前 言

由于制造工艺的改进,大规模集成(LSI)电路的集成密度越来越高,在一个硅芯片上已经可以制作几万个晶体管.现在,许多 LSI 芯片,例如一些微处理机芯片,已把多个复杂的子系统包含进来了,因此,与其说它们是集成电路,还不如说它们是集成系统.

其实,迄今的进展仅仅是开始.当前,每隔一、二年电路的密度就提高二倍.从物理原理上讲,晶体管的面积按比例缩小到目前面积的 $1/100$ 以下,仍能作为开关元件用来构成数字系统.在八十年代后期,将有可能制造出包含几百万个晶体管的芯片.在这样的超大规模集成系统中,器件及其互连线的尺寸将小于可见光的波长.一种新的能用于制备这种电子线路的高分辨率光刻技术现在已经崭露头角.

超大规模集成(VLSI)电子学的出现,不仅向从事制造工艺研究的人们提出了挑战,而且也向计算机科学家、计算机结构学家提出了挑战.数字系统的构造方式、数字系统的设计步骤、硬件和软件的权衡考虑以及计算机算法的设计都将因集成电子学的发展而受到极大的影响.我们相信这个领域将是整个八十年代计算机科学发展的一个重要领域.

直到最近,集成电路的设计仍然属于半导体制造厂内线路和逻辑设计人员的职权范围.搞计算机结构的人则按照传统习惯,利用这些厂家设计制造的标准集成电路去构成系统,很少参与这些线路的设计和规范的制定.电子工程与计算机科学(EE/CS)系的课程也反映了这一传统.他们开设的器件

物理课及集成电路设计课针对不同专业的学生而并不是那些对数字系统结构及计算机科学感兴趣的学生。

本书的目的在于填补目前文献著作在这方面的空白，及向 EE/CS 系的所有学生介绍集成系统的结构与设 计。 本书既包含有关研究领域内单项的研究工作，也包含了大的系统工程设 计项目。 本书可作为集成系统研究生系列课程的基础，然而本书主要是给这一学科的大学生作为精读课本的。这些教材还可作为计算机结构课的补充教材。我们假定本书的读者在计算机科学、电子电路及数字系统设计方面已具有初步知识。

要对集成系统作全面了解存在着几个主要障碍：集成电子学是在激烈竞争、相互保密的企业环境下发展起来的。不同的器件工艺、线路设计系列、逻辑设计技术、掩模及硅片加工技术等迅速发展，这些工艺技术大部分又是起源于加利福尼亚的旧金山湾地区的硅谷，因此，很多专家都聚集在这一地区，至于工业界中大多数的工作人员都是专注于某个很窄的专业领域的。许多公司又独立地进行了各自的集成电子学技术的开发，因此所使用的名词术语及专业实践也各不相同。

在这个背景下，以往集成电子学的教科书大多是详细剖析整个学科中一些非常狭窄的部分，例如器件物理或线路设计，这些书籍还往往由于对涉及的内容讨论的过分具体而受到种种束缚，从而限制了它们的适用范围。

与此相反，我们决定只选一些器件、电路、制造工艺、逻辑设计技术及系统结构方面的基本知识，使读者能全面掌握从物理基础到完整的超大规模集成数字计算机系统整个领域的精髓。这样做，实际上只用较少的关键概念就够了。只有了解了每一个命题的精髓，并在各个阶段的学习中掌握一些最起码的材料，学生们才能对整个学科有全面的了解。 这样的

理解就能够反映到读者自己所从事的应用、工艺及技术教育的各个工作领域中去。

集成电子学的迅速发展引起了另一个困难：有关的技术知识很快就会因过时而废弃，这种状况主要是制备工艺的不断改进所造成的。随着器件尺寸的日益变小，器件性能也不断有所变化。我们解决这个困难的办法是强调器件尺寸按比例缩小所造成的影响，从而预言出系统结构参数的各种变化。这样，读者就可以了解到在分别由 $6\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 器件组成的系统中，哪一些问题是共同的，哪一些问题是不同的。

虽然本书的材料是按某种特定的次序安排的，但阅读时并不需按这个顺序。各章按不同的深度取材于集成系统各有关的学科体系中。共分四个主要部分：第一、二章是器件、电路及其制备基础；第三、四章是系统设计基础及其实现；第五、六章举了一个大规模集成电路系统的设计例子；第七、八、九章讨论了当前研究工作中几个感兴趣的课题。我们建议读者从自己最熟悉的章节开始阅读，直到需要了解其他章节所描述的相邻领域的知识时再去读有关章节。按这一原则，并在必要时查阅本书提供的参考文献，就能够逐步把各章节的主要内容读完。虽然书中大部分资料以前没有发表过，但这些资料都只涉及基本概念，由于这些概念涉及的学科范围广，所以只有对全书都比较清楚之后才容易真正了解它。

任何一种工艺，其采取的形式总是按照一定的规律服从于要求实现的功能的，因此初步了解某一种工艺技术究竟能实现哪些功能，最有效的方法是仔细地挑选出一批已有的设计项目来加以研究。然而，系统的结构及设计和任何一门技术一样，只有通过实际去做才能真正了解。因此我们从概念

出发,从头至尾圆满完成一个比较小的设计项目,从而使我们具有必要的信心去承担更大的设计项目。也只有这种作法行通了,成功的可能性才展现出来。本书选了一组设计实例,还叙述了各个设计的实现过程,由于 nMOS 的密度、速度及布局等特性,和 nMOS 工艺的硅片制备容易了解等原因,我们就选这种工艺作为例子。其实,一旦熟悉了把逻辑功能转变为具体图案的布局结构的技巧,它是不难推广到其他工艺中去的。

在一些主要的大学中普遍地开设超大规模集成系统的设计课程标志着电子学迎来了一个新纪元。这种令人瞩目的工艺技术的采用使系统变革的速度不再受到少数半导体公司及一些大的计算机生产厂家认识上的限制了。新引伸出的计算方法、新的设计方法、许多新的应用领域正在大学里,在搞系统的工厂内及许多新的小企业中兴起。对于自由企业来说,从来没有过目前这种环境所提供的好机会。

这一领域中充满了激动人心和期待成功的气氛。许多不同背景的工作人员正在联合起来,计算机科学家、电气工程师、数学家、物理学家正在这一方兴未艾的共同领域内通力合作。这是一个巨大的、远未被充分开发的领域,巨大的荣誉属于那些一往无前的人们。

C. 米德 L. 加威

1979 年 7 月于加利福尼亚

背 景

本书原是加州理工学院的 C. 米德 (Carver Mead) 讲授集成电路设计课的教程。他在 1970 年开始讲授该课程, 从 1971 年起, 参加这门课的学生就开始独立地进行集成电路的设计和审该。他们只借助一些比较简单的执行手段, 承担着越来越复杂的系统设计工作。本书介绍的结构式的设计方法也是在这样的条件下逐步完善起来了。在和工业界的朋友们就这些早期的课程交换意见的过程中, 我们是受益匪浅的。特别是 Robert Noyce、Gordon Moore、Frederico Faggin、Dov Frohman-Bentchkowsky、Ted Jenkins 和 Joel Sorem。

1976 年在加州理工学院创办了另一项集中讨论集成系统的计算机科学活动, 在此之前, 由 L. 加威 (Lynn Conway) 领导, 在希罗思·帕罗·阿尔多研究中心 (PARC) 成立了工业部门, 当时正在崛起的大规模集成系统领域的系统设计师参加的非正式协会。加州理工学院的学生、教员与工业界研究人员与日俱增的交往有力地推动了双方的研究工作。

本书的写作始于 1977 年 8 月, 来自大学及工业界的合作者共同参加了这项工作。在正式出版之前, 把为数不多的稿本分发给一些大学的指定专业作为集成系统课的讲义。前三章 1977 年 C. 米德曾在加州理工学院用作讲义, Carlo Sequin 则在加州大学伯克利分校用作讲义。前五章于 1978 年春在加州理工学院被 Ivan Sutherland 及 Amr Mohsen 采用过, Robert Sproull 在卡内基-梅隆大学采用过, Dov Frohman-Bentchkowsky 在耶路撒冷的赫贝勒大学采用过, Fred Rosenberger 在圣·路

易斯城的华盛顿大学采用过。第三稿,也就是包含了全部九章的最后一稿的样本,于1978年秋曾用于加州理工学院及加州大学伯克利分校,此外,Kent Smith曾用于犹他(Utah)大学的新设课程中。另外,L.加威访问麻省理工学院期间也采用过。

在本书正式出版之前,1978年通过麻省理工学院的课程作了最后一次检验,目的在于验证本课程作为工程学科教材的适用性(对于工程学科,要在强调形式上分析的同时强调结构上的创造性设计活动)。还要验证下列作法在技术上及经济上的可行性,即为了加速设计的进程,把学生们作的大规模集成电路设计遥控输入到中心实验室去的作法。麻省理工学院将要把这些内容编为课程6.371,预定在1979年秋由Jonathan Allen讲授。

下面关于麻省理工学院的经验的材料对于打算作同样事情的人也许会有帮助。该课程是九月中旬开始的,有三十名学生参加(他们大部分是EE/CS系的研究生)。进行工程设计所必需的大部分书本知识(包括了节选自本书一至六章的一些内容)在十一月初就讲完了。然后学生们就确定项目并着手设计,设计的截止日期定为十二月五日。大部分设计在这个期限之前就完成了。工程设计包括有一部LISP微处理机、一个能进行位图数据的镜象或旋转操作的绘图仪存贮子系统、一个可写入的PLA设计、一个位片式微处理机的数据通道、一个LRU虚拟-存贮页式子系统、一个可与总线接口的实时时钟、一个灵活的多功能存贮器、几项数字信号处理工程、几种数字控制子系统及许多其他别开生面的设计。

学生们利用DEC-20机的标准编辑文本,把他们的设计描述为CIF2.0的一个简单子集,为了支持课程的进行,在DEC-20系统上所加的硬件只是几个阴极射线管终端,两个

HP 公司的四色绘图仪及一条和本地区的 ARPANET 主机相连的线。新开发的软件也只有一个用于分析 CIF 解析绘图数据及驱动绘图仪的程序。还有一个小型的常用单元库, 包括有带保护二极管的输入块、带级联驱动器的输出块, 一组 PLA 单元以 CIF 的形式存放起来备用。为简化设计编码, 一些学生还研制了自己的符号设计语言和翻译成 CIF 形式用的翻译软件。采用了这种结构式的设计方法, 学生们只利用一些简单的设计工具就能在较短的时间内做出有实用价值的 LSI 设计。而每个设计都包含有数百至数千个晶体管。为了组织多项目的芯片制作, 借助了 DEC-20 的信息系统来协调这些学生设计人员的工作(修改设计规则、挑选芯片包含的设计项目、协调空间分配、回答个别问题等)。至于和远处的工艺制备实验室的通信联络则通过电子邮递来处理。

1978 年 12 月 6 日各个 CIF2.0 的设计文件从麻省理工学院经由 ARPANET 传到希罗思的 PARC。这是 ARPA 的合用执行人使用成组传送的开关网络传输 LSI 的设计文件及组织多项目芯片制备所作的又一个试验。在 PARC, 学生们的的设计都编到一个多项目芯片的设计文件中去, 根据这个文件, 使用微掩模公司的电子束掩模制作设备制作掩模。硅芯片则在赫威利特-帕克的鹿儿湾实验室制备, 这个实验室还配合做了一些他们力所能及的测试工作。制成的硅芯片送回到麻省理工学院后, 根据不同的项目采用不同的电子测试图案进行电学测试, 然后进行划片及成品封装。按不同的项目进行引线压焊, 封装好的芯片在 1 月 18 日以前提供给学生们使用。在这以后, 学生们对许多项目都仔细地进行了功能测试。其中一些项目具有完全正确的功能。多数项目只存在一些缺点, 主要是逻辑方面的一些疏忽, 属于首次使用一种新语言编制大程序出现的不熟练所造成的问题。

当一种具有普遍意义的超大规模集成系统的设计方法被广泛采用时，就会有更高级的设计辅助手段通过吸取该设计方法的精萃而发展起来。若标准接口的工艺设备也可从商业渠道得到的话，无疑的，我们将看到大学的师生们会开设出更为丰富的课程，组织起更为绚丽的工程项目及研究活动，从而揭开一个新的篇章。

目 录

第一章 MOS 器件及电路	1
1.1 MOS 晶体管	1
1.2 标准倒相器	6
1.3 倒相器的延迟	13
1.4 寄生效应	15
1.5 驱动大电容负载的情况	16
1.6 面积与时间的关系	18
1.7 标准的与非及或非逻辑电路	20
1.8 超级缓冲器	23
1.9 对电学参数的进一步考察	25
1.10 耗尽型上拉管与增强型上拉管的关系	27
1.11 另一种形式的逻辑电路的延迟	30
1.12 由传递晶体管耦合的倒相逻辑的上拉管对下 拉管的尺寸比值	33
1.13 传输时间及时钟周期	35
1.14 交叉耦合电路的性质	36
1.15 一种形象化说明 MOS 晶体管性能的流体模 型	40
1.16 按比例缩小 MOS 电路及系统的尺寸带来的 影响	45
参考文献	50
第二章 集成系统的制作	52
2.1 制图	53

2.2	作图技术的尺寸问题	57
2.3	硅栅 n 沟 MOS 工艺	57
2.4	成品率统计	61
2.5	小尺寸工艺技术	63
2.6	设计规则	64
2.7	电学参数	69
2.8	导体中的电流限制	71
2.9	对某些细节的进一步考察	72
2.10	工艺的选择	76
	参考文献	81
第三章	系统结构的数据流和控制流	82
3.1	引言	82
3.2	标记方法	85
3.3	两相时钟	87
3.4	移位寄存器	88
3.5	不同程度的抽象化	91
3.6	动态寄存器的实现	94
3.7	一个子系统的设计	96
3.8	寄存器到寄存器的传送	101
3.9	组合逻辑	103
3.10	可编程程序逻辑阵列	107
3.11	有限状态时序机	111
3.12	向结构式设计方法的方向发展	119
	参考文献	121
第四章	集成系统设计的实现: 从电路布局到图案形 成,再到硅片制作	122
4.1	引言	123
4.2	作图与硅片制备	125

4.3	使用符号布局设计语言进行人工布局及数字化	131
4.4	一种人机交互式的布局设计系统	144
4.5	加州理工学院的描述 LSI 布局设计的中间格式	151
4.6	多项目芯片	168
4.7	未来的作图与硅片制备技术	180
	参考文献	188
第五章 LSI 计算机系统概论和 OM 2 数据通道芯片设计		
5.1	引言	190
5.2	加州理工学院的 OM 设计项目	191
5.3	系统概述	192
5.4	数据通道的全部结构	195
5.5	运算器	196
5.6	运算器寄存器	203
5.7	总线	205
5.8	桶式高速移位器	206
5.9	寄存器阵列	214
5.10	与外部的信息通讯	217
5.11	数据通道的控制操作编码	219
5.12	OM 2 数据通道芯片功能说明	221
第六章 系统控制器的结构和设计以及 OM2 控制器芯片的设计		
6.1	引言	238
6.2	一些可采用的控制结构	239
6.3	存贮程序计算机	243
6.4	微程序控制	252

6.5	OM 2 控制器芯片的设计	257
6.6	控制器操作举例	267
6.7	关于经典的存贮程序机的一些想法	273
	参考文献	275
第七章	系统定时	276
7.1	第三维度	276
7.2	同步系统	279
7.3	时钟分配	290
7.4	时钟产生	296
7.5	同步失效	300
7.6	自动定时系统	307
7.7	自动定时信号制	320
7.8	自动定时元件	323
	参考文献	332
第八章	高并行系统	334
8.1	引言	334
8.2	常规计算机中的通讯和并行	335
8.3	用于 VLSI 处理机阵列的算法	344
8.4	层次组织的机器	370
8.5	总通讯的高并行结构	398
8.6	未来的任务	419
	参考文献	420
第九章	计算系统物理学	423
9.1	数字系统	424
9.2	电压极限	434
9.3	电荷的离散性	436
9.4	量子力学系统中的瞬变	437
9.5	不可逆性	443

9.7 热极限	455
9.8 量子极限	456
9.9 两种技术——一个例子	458
9.10 计算的复杂性	464
9.11 计算的熵观点	465
9.12 结论	471
参考文献.....	471

第一章 MOS 器件及电路

我们先讨论 n 沟金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOS FET) 的基本性质。然后再去描述及分析一些由 MOS FET 互连组成的电路。这些电路是我们在集成系统设计中常用的一些典型电路。所作的分析虽经高度概括,但概念上是正确的,并且将为解决大多数系统中遇到的典型问题打下了基础。

MOS 工艺的集成系统含有三个导电层,它们彼此间由绝缘材料隔离层分隔开。从上到下,这些层分别称为金属层,多晶硅层及扩散层。这三层走线图案以及为了进行层间定点互连而穿过绝缘层的接触孔图案都是在制造过程中由一组类似于照相负片的掩模转印到各层上去的(制造工艺细节将在第二章讨论)。

只要绝缘层上没有接触孔,金属线就可以横跨多晶硅线或扩散线而不会对功能有显著影响。然而,多晶硅线与扩散线交叉之处却会形成一个晶体管。这种晶体管具有简单的开关特性,其多晶硅线上的电压能控制扩散线上流通的电流。用这一类晶体管并由第三层上的布线形成互连所组成的电路构成了我们的基本积木块。我们将用这些基本电路来设计集成系统,并把它们做在单块硅晶片的表面上。

1.1 MOS 晶体管

在集成系统的芯片上,凡是多晶硅线与扩散线交叉的地