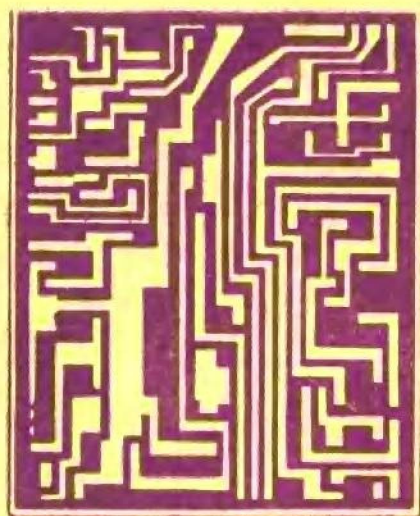


# 超大规模 集成电路系统设计

SABURO MUROGA 著

秦世才等译 赵英校



南开大学出版社

1987年·天津

# 超 大 规 模 集成电路系统设计

SABURO MUROGA 著

秦世才等译 赵英校

南开大学出版社

1987·天津

## 内 容 提 要

本书主要讲述大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)的系统设计技术和设计方法,阐明LSI/VLSI设计中的一些关键问题。

全书共分10章,第1~2章概述了LSI/VLSI的优缺点,分析了影响成本的因素,第3~4章介绍了各种逻辑电路及逻辑设计和版图设计方法,第5章对各种逻辑电路进行对比分析,第6~7章讲述LSI/VLSI中的关键电路ROM和RAM,第8章讲述计算机辅助设计,第9章讲述专用和半专用集成电路,第10章综述系统设计中的问题及展望。

本书是大专院校半导体专业的教师、研究生、大学生的教学用书,是半导体专业研究所、现代半导体厂的科研、技术人员的参考书。

《VLSI System Design》

John Wiley & Sons, Inc. 1982年版

超大规模集成电路系统设计

SABURO MUROGA 著

秦世才 等译 赵英 校

南开大学出版社出版

(天津八里台南开大学校内)

新华书店天津发行所发行

天津大邱庄印刷厂印刷

1987年7月第1版      1987年7月第1次印刷

开本: 850×1168 1/32    印张: 21.625

字数: 537千            印数: 1—1,500

统一书号: 13301·11    定价: 4.35元



## 译者的话

七十年代以来，信息技术的飞速发展和广泛应用已成为推动社会经济发展的巨大动力。信息的获取、处理、存贮和传输都依赖于电子计算机，而集成电路，尤其是大规模和超大规模集成电路是电子计算机工业的基础。

本书着重讲述大规模和超大规模集成电路系统设计中的一些关键问题，如体系结构设计、逻辑设计、电子电路设计和版图设计等。全书共分十章。前言和第八章由秦世才译；第一、二章由王朝英译；第三章由牛秀卿译；第四、十章由贾香鸾译；第六、七章由赵腊月译；第五、九章由刘永译。秦世才对第三、四、五、六、七、十章进行了审改，全书由赵英校。

南开大学王家骅同志对本书初稿进行了详细的审阅，在此谨表示衷心的感谢。

译者希望本书的翻译出版能对我国大规模和超大规模集成电路的设计、制造和应用人员、软件设计人员、大专院校有关专业的师生有所裨益。由于译者水平有限，错漏之处在所难免，恳望读者批评指正。

译者

1986.5.

## 前 言

最近几年，从手表、玩具、电视游戏、家庭和个人计算机到大型计算机等越来越多的产品都用上了LSI（大规模集成电路）和VLSI（超大规模集成电路）芯片。而且软件和系统也都合并到LSI和VLSI芯片上。因此，很多工业界人士，从芯片设计者和制造者到芯片的使用者、软件设计人员、管理人员，对LSI/VLSI系统设计都有浓厚的兴趣。本书讲述LSI/VLSI设计及其中的一些关键问题。

该书来自我的讲课笔记。我为LSI/VLSI技术的进步而欢欣鼓舞，也想把我的激情转达给学生。在经过几年准备之后，我于1974年开始讲授LSI/VLSI系统设计，自那以后，对这些笔记进行了反复修改和补充。由于集成电路设计涉及很多方面，每个方面又都很复杂，而各个方面之间的相互关系则更复杂，因此这并不是一件容易的事。但是学生们的热情促使我坚持下来。

实际上，集成电路所涉及的不仅是把门电路、互连线和存储器等集成到一个芯片上，它还要求学生具备各种其它方面的集成知识。因为不同方面之间存在着错综复杂的关系，而对不同的设计方法还要权衡取舍，所以学生们在学过专业课之后要得到其它方面的集成知识是很难的。因此把一些专业课程的材料“拽到一起”的课是很需要的。我相信这样的课在未来将日渐重要。

虽然本书对有关的方面，如体系结构、逻辑设计、电子电路和版图设计等都进行了讨论，但主要集中于逻辑设计。原因如下：第一，因为每个制造厂都需要生产大量的专用设计芯片（Costom-designed Chip），而有些逻辑设计人员在芯片设计的整个过程中都要陷在里面，所以逻辑设计人员将严重缺乏。

(如表4.7.16表明的,版图设计最费时间,虽然它主要由绘图人员来做,但从版图设计的第一步到最末一步,都必须由具备体系结构和电子电路设计知识的逻辑设计人员来指导。)第二,在逻辑设计中不同方法论之间的权衡取舍对LSI/VLSI系统设计是很重要的。方法论是逻辑设计中的一个重要的新问题,因为在逻辑设计中选用适宜的方法论会缩短芯片设计时间,尤其是版图设计和测试时间。例如,用PLA(可编程序逻辑阵列)的逻辑设计大大减少了设计时间,因为它可采用代数最小化〔这可由CAD(计算机辅助设计)来做〕,而且PLA的结构规则,版图也较简单。相反,用随机逻辑网络的逻辑设计花费的时间要长得多,但是这样设计出来的芯片性能高,尺寸也小。在任何情况下,我们都必须在逻辑设计中不同的方法论进行比较,找出利弊得失。第三,学生应当掌握一些设计方面的基础理论,因此LSI/VLSI系统设计决不是一个简单的课题,它是以许多不同方面的集合为基础的,如制造、电子电路、固体物理和体系结构等。但是,如果假设学生在这些方面一无所知,则本书所讲的恐怕就不够了。从这个意义上讲,本书是假设了他们已具有一定的逻辑设计和基本电子学的知识。对逻辑设计知识的假设是因为学生学起来比较容易,即使那些没有电子学知识的学生也是这样。在伊利诺斯大学,学生在学这门课之前已学过逻辑设计课,教材是我在1979年出版的Logic Design and Switching Theory(逻辑设计和开关理论)〔该书为LSI/VLSI逻辑设计提供了理论基础,阐述了CAD技术对逻辑设计效率的提高,如对PLA最小化、MOS网络分析、或非(或与非)网络设计、鉴别和模拟等〕。但是通过让学生们自学其它书的有关章节,或者通过课堂补充,学生也可直接由本书学起。如果读者对详尽的逻辑设计并无兴趣,他们由本书(而不用其它的书)也能领略一下,LSI/VLSI系统设计。其次,对具有某些电子学知识的假设是因为LSI/VLSI

技术与电子学有极其直接的关系。但是对电子学知识的要求是很低的，读者只要了解晶体管和二极管的端特性即可。例如，读几章电子学的书〔如R. J. Smith写的 *Circuit and Devices*（电路与器件），第二版〕是很有帮助的。

本书第一章概述了使用LSI/VLSI的优缺点和基于LSI/VLSI系统的许多新产品的例子。第二章在评述了制造工艺之后，讨论了LSI/VLSI芯片成本分析问题。芯片成本有许多复杂的影响因素，如成品率、芯片尺寸、设计人力、生产量等。这种经济上的考虑对后面几章的芯片设计方法论是很重要的。在某些情况下，设计数字系统时使用MSI（中规模集成电路）或SSI（小规模集成电路）组件来取代LSI或VLSI芯片可能更好一些。在第三章和第四章中，讨论了主要逻辑系列的重要特点，也讲述了逻辑设计方法和版图设计。第五章对各种逻辑系列进行了比较，概述了技术发展趋势。第六章归纳了LSI/VLSI芯片设计中常用的各种类型的存贮器。讨论了用RAM（随机存取存贮器）做为逻辑网络一部分的问题。第七章讨论了用ROM（唯读存贮器）做为逻辑网络一部分的问题。随着集成规模的增加，设计时间变得非常长（大部分花在测试和版图上），这正在成为一个严重的关卡。为了缩短设计时间，像ROM和PLA这样的规则结构网络将用的越来越多。第七章还讨论了用ROM代替逻辑门的优缺点。ROM的使用并不是直接了当的，设计者在使用ROM时必须研究合适的适于给定计算任务的算法。本章介绍了这样的一些算法及使ROM规模最小化的方法。第八章概述了CAD在LSI/VLSI系统设计的各个方面的应用。第九章讨论了半专用与全专用设计。LSI/VLSI芯片的全专用设计就提高性能和降低成本而言是最佳的，但其设计时间也最长。为了在设计时间、成本、性能和其它可能因素之间找出适宜的权衡，已研究出了一整套半专用设计方法。例如，使用微型计算机就是缩短设计时间的一条

途径。所有这些问题都从权衡的观点出发进行了讨论。对微处理机芯片设计中的一些问题也进行了探讨。第十章讨论了系统设计问题及硬件——软件的权衡折衷问题，并预示了未来VLSI系统设计中的的一些问题。

使我惊喜的是，许多从前对电子学和制造技术等毫无兴趣的学生，在选用本书的芯片设计课的激励下也开始听这些专业课了。这些学生中不少人已成为LSI/VLSI系统的设计师或已经从事有关CAD的职业。

由于LSI/VLSI设计的复杂性以及从事该研究课题的广泛性，因而要编写阐述这一技术的书就产生了一些问题。例如，为了避免过于复杂，有些方面没有详细讨论，因此引用了大部分指导和评述文献。本书的主要目的之一是比较不同的技术，但完全公平的比较实际上是不可能的，因为一种技术中的新结果总要与其它一些技术中的老结果相比较，而且技术也在不断变化。关于芯片设计的各个方面已先后发表了许多文章，我已尽了一切努力不漏看任何适于本书的关键文章。特别是在与LSI/VLSI系统设计有关的广阔的领域内，我都尽力不曲解任何内容和遗漏任何要点。原论文中的含糊与错误有时使这种情况变得更糟，尤其是许多设计图在发表时有错。关于这一点，我要感谢那些已给以澄清的作者和为我纠正过错误的作者，也感谢那些提供管芯照片和相应资料的制造厂家。

通用微处理芯片的体系结构设计未仔细讲，只在第九、第十章讨论了芯片体系结构和常规计算机体系结构的差异。这是因为现有芯片体系结构与常规主机和小型计算机的体系结构并无太大差别，读者可从详细论述常规计算机体系结构的书中学到这方面的内容。LSI/VLSI工艺更加直接地影响前几个设计步骤，即版图、电路和逻辑设计步骤，而芯片的体系结构与主机和小型计算机体系结构的不同正是这些影响的结果，这在前几章中都做了



讨论。

书中提到的我组的一些研究结果是通过J. R. Lehman 博士的计算机系统设计计划在国家自然科学基金资助下多年所得到的成果。我特别感谢Z. Arbatsky夫人，她辛苦地打出了本书的原稿。

LSI/VLSI技术的进展本身就是优美动人的，学起来令人激动。我希望能把这种美好和激动传给读者们。

SABURO MUROGA

1982年夏于伊利诺斯

#### 关于标有▲符号的节和注释

本书中标有▲符号的节（或小节）和注释表示较深的知识，跳过这些对理解后面的内容没有妨碍。建议在院校教学中不讲这些注释。

### 换算表

1 密尔	$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-3} \text{吋} \\ 25.4 \text{毫微米}(\mu\text{m}) \end{array} \right.$
1 立方英尺	28 升
1 升	1 立方分米
1 (Å)	$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-10} \text{米}(\text{m}) \\ 10^{-8} \text{厘米}(\text{cm}) \\ 10^{-4} \text{微米}(\mu\text{m}) \\ 10^{-1} \text{毫微米}(\text{nm}) \end{array} \right.$
1000 埃(Å)	0.1 毫微米 ( $\mu\text{m}$ )

### 倍率——前缀——缩写 表

倍率	前缀	缩写
$10^{12}$	tera	T
0	giga	G
$10^6$	mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hecto	h
10	deka	da
$10^{-1}$	deci	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

# 目 录

## 换算表

## 倍率—前缀—缩写

## 第一章 绪言

1.1 集成电路技术的进展和影响..... (1)

1.2 元件制造..... (10)

1.3 IC优于分立元件之处..... (24)

## 第二章 制造和成本分析

2.1 IC 组件的制造 ..... (29)

2.2 成品率..... (44)

2.3 成本分析..... (51)

2.4 关于制造工艺的进一步讨论..... (60)

2.5 IC 逻辑系列和逻辑设计方法的选择..... (68)

习题..... (71)

## 第三章 双极型逻辑系列的逻辑设计和掩模设计

3.1 双极型晶体管..... (74)

3.2 TTL (晶体管—晶体管逻辑) ..... (80)

3.3 双极型晶体管电路的版图设计..... (103)

习题..... (112)

3.4 ECL (发射极耦合逻辑)..... (116)

习题..... (137)

3.5 其他双极逻辑系列..... (139)

习题..... (155)

3.6 本章小结	(158)
----------	-------

## 第四章 MOS逻辑系列的逻辑设计和掩膜设计

4.1 MOSFET (金属-氧化物-半导体场效应晶体管)	(160)
4.2 MOS网络的逻辑设计	(174)
4.3 电子电路设计中的一些问题	(187)
4.4 或非和与非门混合的MOS网络的逻辑设计	(196)
4.5 非规范的有用MOS网络例	(200)
习题	(203)
4.6 静态MOS电路的版图设计	(204)
4.7 芯片设计的全过程	(215)
习题	(224)
4.8 动态MOS网络	(227)
习题	(241)
4.9 CMOS (互补MOS)	(242)
4.10 其他MOS工艺	(270)
习题	(274)
4.11 本章小结	(276)

## 第五章 逻辑系的比较和工艺发展动向

5.1 各种逻辑系列的比较	(278)
5.2 兼容性	(284)
5.3 各电路系列的集成度	(284)
5.4 工艺发展动向	(287)
习题	(297)

## 第六章 存贮器

6.1 半导体存贮器的特点	(298)
6.2 RAM (随机存取存贮器)	(300)

6.3	用RAM代替逻辑网络 .....	(310)
6.4	掩模编程ROM .....	(313)
6.5	PROM (可编程序的只读存贮器) .....	(318)
6.6	可清除ROM .....	(320)
6.7	半导体存贮器的比较 .....	(323)
6.8	其他类型的存贮器 .....	(327)
6.9	所有存贮器的比较 .....	(330)

## **第七章 在逻辑设计和任务实施算法中的ROM**

7.1	在逻辑设计中使用ROM 的动力 .....	(335)
7.2	波形和字符发生器 .....	(338)
7.3	组合逻辑网络 .....	(342)
7.4	时序逻辑网络 .....	(353)
7.5	代码转换 .....	(353)
	习题 .....	(369)
7.6	用于计算的ROM .....	(370)
7.6.1	加法 .....	(371)
7.6.2	乘法 .....	(372)
7.6.3	平方根 .....	(373)
7.6.4	三角函数 .....	(378)
7.6.5	其他函数 .....	(381)
7.6.6	关于ROM网络的最终评论 .....	(381)
7.7	PLA (可编程序逻辑阵列) 及其变形 .....	(381)
▲7.8	现场编程阵列逻辑(FPAL) .....	(402)
▲7.9	多级门阵列 (MGA) .....	(404)
▲7.10	存贮器在计算机中的应用 .....	(408)
7.11	本章小结 .....	(411)
	习题 .....	(413)

## **第八章 计算机辅助设计 (CAD)**

8.1	系统说明、功能设计和逻辑设计	(416)
8.2	逻辑模拟	(417)
8.3	网络划分和芯片设计	(418)
8.4	电子电路的模拟和分析	(418)
8.5	布局	(421)
8.6	设计的检验与测试	(424)
8.7	CAD程序的一些问题	(425)
8.8	CAD数据库系统和CAM	(427)
8.9	有关CAD的参考文献	(429)
	习题	(429)

## 第九章 全专用和半专用电路设计方法

9.1	不同的设计动机	(430)
9.2	用分立元件和现有组件的设计	(435)
9.3	全专用电路设计方法	(437)
9.4	半专用电路设计方法	(442)
9.4.1	门阵列	(442)
9.4.2	单元库设计方法	(472)
9.4.3	其他设计方法	(475)
9.5	不同设计方法的比较	(480)
9.5.1	通用组件设计方法	(480)
9.5.2	专用组件设计方法	(481)
9.6	微型计算机	(488)
9.6.1	特性和应用	(488)
9.6.2	先进的或特殊的微型计算机	(505)
9.6.3	微处理机和微型计算机的设计	(506)
9.7	各种设计方法的比较	(514)
	习题	(519)

## 第十章 系统设计及未来的若干问题

10.1	系统设计中的一些问题.....	(523)
10.2	硬件和软件的权衡考虑.....	(526)
10.3	未来的一些问题.....	(535)
<b>附录</b>	<b>用数目最少的非门设计网络的方法4.2.1的理论基础</b>	<b>(543)</b>
<b>参考文献</b>	.....	<b>(548)</b>

# 第一章 绪 言

在这一章里，我们从大规模集成电路（LSI）和超大规模集成电路（VLSI）技术所产生的社会效果来评论集成电路技术的进展，然后叙述LSI/VLSI的基本知识和特点。

## 1.1 集成电路技术的进展和影响

由于可以大量制造低成本、低功耗、高速度和小尺寸的数字系统，最近几年集成电路（IC）技术的巨大进展改变了我们日常生活中的许多事情。表1.1.1中列出了第一代电子计算机ENIAC和Hewlett - Packard的袖珍计算器HP - 67的性能对比，从中可以看出进展的情况。后者实质上就是可以拿在手中的ENIAC，ENIAC有18000个电子管，占地面积为300m<sup>2</sup>，而1978年生产的Z8000微处理机芯片包含有17500个晶体管，其面积仅为3.9mm<sup>2</sup>，可见30年间的变化是多么巨大。

Texas仪器公司的袖珍计算器T1 - 59标价是300美元，它含有100个寄存器的数据存贮器和960条指令的程序存贮器。根据Texas公司的说明，T1 - 59的计算功能与1959年生产的IBM1401相当。IBM1401的体积约占一个房间，售价约70,000美元。1975年生产的IBM5100可放置在桌子上，其存贮器的容量与10年前生产的IBM360/30相当，但它的售价约等于360/30的一个月的租金。（1978年生产的IBM5110的速度快了30倍，售价为9900美



元) 1960年的时候在大型计算机中1兆字节的主存贮器是很少见的, 而1978年生产的Hewlett-Packard Amlgo-300小型商业系统用的计算机其存贮器的容量则大得多, 而它的售价仅是32000美元。计算机中使用IC芯片的数目越来越少, 在60年代中期, 典型的计算机中含有90到150个双极IC芯片。到1969年只用四块MOS芯片就与之相当了。在1971年只用一块MOS芯片就够了。价格约降低到五分之一。现在单片的性能不断得到改进, 可以预计, 在今后十年到十五年间, 在尺寸、价格和成本上会有类似的进展。

表1.1.1. 老的计算机与新的计算机的比较

	ENIAC (1946)	HP-67 (1977)	近似比
字长	10个十进制数	10个十进制数	1 : 1
数据存贮能力	2) 寄存器	26个寄存器	1 : 1.3
程序存贮能力	750个指令	224个指令	3.3 : 1
输入/输出	穿孔卡	磁带卡	
读出率	200个数/秒	50个数/秒	4 : 1
控开关	5000	35	140 : 1
乘法数目	360/秒	15/秒	24 : 1
成本	480000美元	375美元 (1980)	1300 : 1
功耗	50000瓦	0.5瓦	100000 : 1
体积	10×100×4呎 (400呎 <sup>3</sup> )	3.2×4×6吋 (27吋 <sup>3</sup> )	270000 : 1
重量	39吨	238克	100000 : 1

本书的目的是从IC制造到数字系统设计的各方面描绘 IC 芯片设计的进展并进行评论。但并没有详细的讲述有关的电子学、固体物理和化学方面的内容。这对计算机工程师 (或计算机科学