

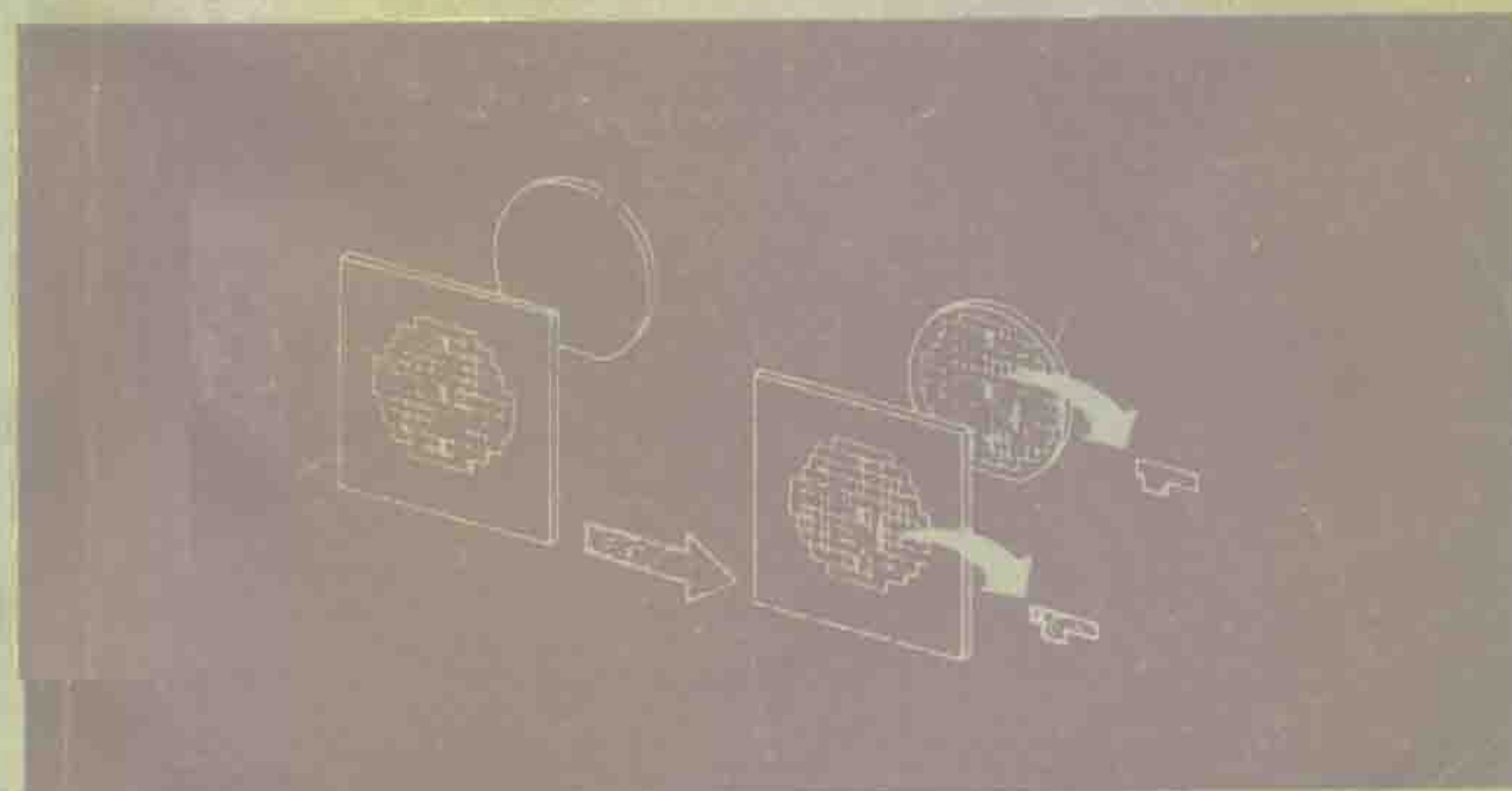
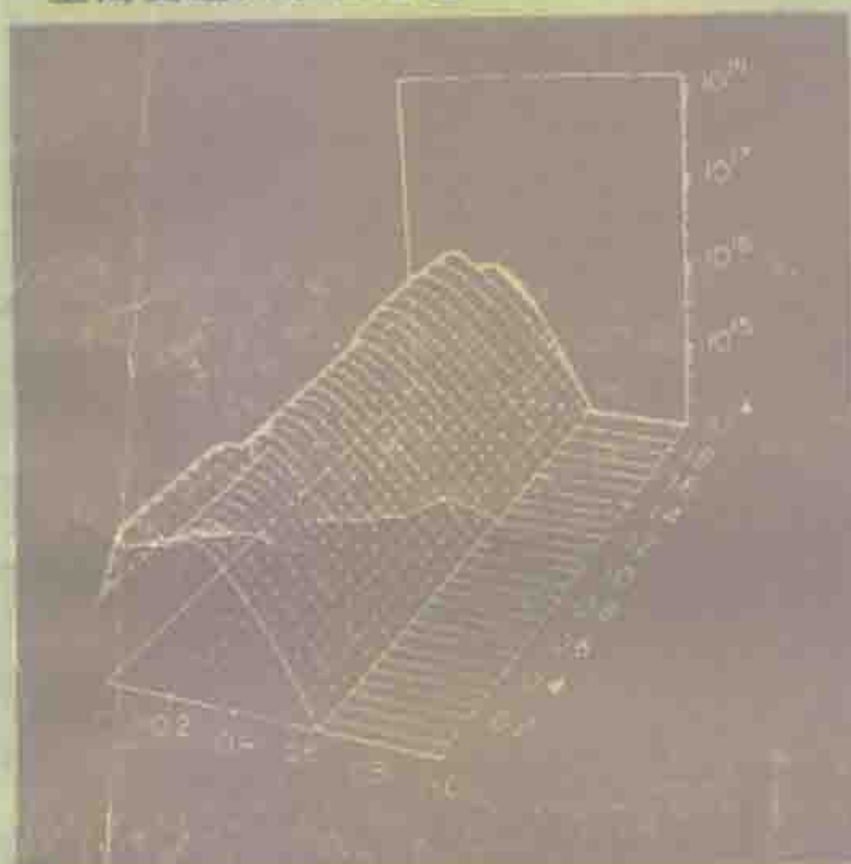
超大规模集成电路

史常忻 等译

顾振军 校

上海交通大学出版社

工艺学



超大规模集成电路工艺学

[美] 史 西 蒙 主 编

史常忻 等 译

顾振军 校

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书内容全面、新颖，详细地讨论了硅集成电路的工艺原理，包括晶体生长和片子制备，外延，介质和多晶硅淀积，氧化，扩散，离子注入，光刻，干法刻蚀，金属化，装配和管壳，成品率和可靠性。还着重介绍了工艺模拟及用于工艺检测的各种诊断技术。

本书可作为高等学校有关专业研究生和本科生的教材，也可供研究人员及工程技术人员参考。

超大规模集成电路工艺学

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

崇明永南印刷厂 印装

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 29.25 字数 723000

1987年10月第1版 1987年11月第1次印刷

印数 1—2500

标准书号： 科技书目：159—307

ISBN7—313—00046—4/TN4 定价：4.80 元

译 者 的 话

《超大规模集成电路工艺学》是由美国贝尔实验室 (Bell Laboratory) 中从事超大规模集成电路研究的学者、工程技术人员们所编写, 由史西蒙 (S.M.Sze) 主编。内容全面而新颖, 涉及硅集成电路全部工艺的原理和实践, 特别是关于工艺诊断和工艺模拟的内容是同类书中所缺少但却十分重要的。每章后附有习题和大量参考文献, 可供读者深入研究。本书可作为我国半导体、材料科学、电子技术等方面的高年级大学生、研究生教学用书, 也是在这些方面工作的科研工作者和工程技术人员极好的参考书。参加本书翻译的人员有史常忻(绪论、第一章), 戴庆元(第二章、第七章), 应再生(第三章、第八章、第九章), 朱美华(第四章), 邵传芬(第五章、第十三章), 王庆康(第六章), 余兴(第十章、第十一章), 陆鸣(第十二章、第十四章)。全书由史常忻统稿, 由顾振军教授仔细校阅。

译者

一九八六年十二月

序 言

《超大规模集成电路工艺学》一书介绍了最先进的电子学技术——超大规模集成电路(VLSI)的理论和实际。它给读者介绍了,从晶体生长到可靠性测试,超大规模集成电路制造的主要工序。同时还详尽地讨论了诸如工艺模拟和诊断技术等很多的广泛课题。每一章描述了超大规模集成电路工艺的一个方面。各章中的引言叙述该课题的一般介绍;为了得到所要求参量的必需的工序和为了获得在器件性能和制造能力上的最佳折衷考虑,接下来各小节分别叙述每一工序的基本科学知识。每一章章末的习题也构成了各章的不可缺少的组成部分。

本书可作为电机工程系,应用物理系,材料科学系的四年级大学生或一年级研究生的教科书。读者应具有半导体器件物理和工艺的一般知识。因为本书对集成电路工艺技术做了详尽和深刻地叙述,故也可做为积极致力于集成电路制造和工艺发展人员的参考书。

这一教材始用自1979年,它作为贝尔实验室(Bell Laboratories)的连续教育课程,是由许多作者写成的一套讲稿。这一名为硅集成电路工艺的课程,已经给数百名致力于集成电路研究、发展、制造和应用工作的工程师和科学家们讲授。我们对原讲稿作了大量补充和更新,其中包括了超大规模集成电路工艺中最先进和重要的课题。

很多人帮助和支持我们写这本《超大规模集成电路工艺学》。我们首先感谢贝尔实验室和“西电”的行政领导为了保证写作此书的环境所做的安排,没有这一支持,此书难以完成。下列各位综述者对此书所提的建议也使我们受益匪浅: L.P. Adda, C.M. Bailey, K.E. Benson, J.E. Berthold, J.B. Bindell, J.H. Bruning, R.E. Caffrey, C.C. Chang, D.L. Flamm, G.K. Herb, R.E. Howard, E. Kinsbron, P.H. Langer, M.P. Lepselter, J.R. Ligenza, P.S.D. Lin, W. Lin, C.M. Melliar Smith, D.F. Munro, S.P. Murarka, E.H. Nicollian, R.B. Penumalli, J.M. Poate, M. Robinson, D.J. Rose, G.A. Roz Gonyi, G.E. Smith, J.W. Stafford, K.M. String, R.K. Watt和D.S. Yaney 博士。

我们还要感谢, E. Labate 和 B.A. Stevens 先生帮助寻找文献, D. McGrew, J. Chee, E. Doerries 女士, N. Erdos, R. Richton 和 N. Timm 先生在 J. Keelan 女士帮助下对手稿所做的技术编辑工作, A.W. Talcott 女士提供了贝尔实验室的 Murray Hill 图书馆中登录的关于集成电路工艺的 3000 篇以上的技术论文。最后, 感谢 J. Maye 女士和文字处理中心的成员对初稿和最终手稿的打字, R.T. Anderson 先生和绘图室部分成员完成了本书中所用的几百幅技术图表, 以及 T.W. Sze 夫人制作的附录和索引。

S.M. Sze

目 录

绪 论	1
第一章 晶体生长和片子制备	7
1.1 引言	7
1.2 电子级硅	7
1.3 切克拉斯基单晶生长	9
1.4 硅片成形	20
1.5 工艺考虑	26
1.6 概述和展望	28
参考文献	28
习 题	32
第二章 外延	33
2.1 引言	33
2.2 汽相外延	34
2.3 分子束外延	48
2.4 绝缘体上的硅外延	52
2.5 外延层的检测	54
2.6 概述和展望	56
参考文献	57
习 题	61
第三章 介质和多晶硅薄膜淀积	62
3.1 引言	62
3.2 淀积工艺	63
3.3 多晶硅	65
3.4 二氧化硅	71
3.5 氮化硅	79
3.6 等离子体辅助淀积	80
3.7 其他材料	83
3.8 概述和展望	83
参考文献	84
习 题	88
第四章 氧化	89
4.1 引言	89
4.2 生长机理和动力学	89
4.3 氧化技术及系统	100

4.4 氧化层性能	103
4.5 掺杂剂在界面的再分布	106
4.6 多晶硅的氧化	107
4.7 氧化诱发缺陷	108
4.8 概述和展望	110
参考文献	110
习 题	115
第五章 扩散	116
5.1 引言	116
5.2 固体中的扩散模型	116
5.3 一维费克扩散方程	117
5.4 原子扩散的机理	121
5.5 测量技术	125
5.6 B、P、As 和 Sb 的扩散系数	131
5.7 SiO ₂ 中的扩散	138
5.8 硅中的快速扩散剂	140
5.9 多晶硅中的扩散	141
5.10 扩散的增强和延缓	142
5.11 概述和展望	145
参考文献	146
习 题	150
第六章 离子注入	151
6.1 引言	151
6.2 离子注入系统和剂量控制	151
6.3 离子射程	154
6.4 无序生成	163
6.5 注入掺杂剂杂质的退火	165
6.6 浅结 (As, BF ₂)	172
6.7 少数载流子效应	174
6.8 吸杂	174
6.9 在超大规模集成电路工艺中的作用	177
6.10 概述和展望	177
参考文献	178
习 题	183
第七章 光刻*	185
7.1 引言	185
7.2 光刻工艺过程	186

* 原文 Lithography 为石刻术之意, 本文中译为“光刻”, 故下文有光学光刻, 电子束光刻等名称, ——译者。

7.3	光学光刻	190
7.4	电子束光刻	194
7.5	X射线光刻	198
7.6	其他的光刻工艺	203
7.7	概述和展望	205
	参考文献	206
	习 题	209
第八章	干法刻蚀	211
8.1	引言	211
8.2	图形转移	211
8.3	低压强气体放电	217
8.4	等离子体辅助刻蚀技术	221
8.5	刻蚀速率和选择性的控制	223
8.6	边缘剖面的控制	230
8.7	副作用	233
8.8	超大规模集成电路技术中的干法刻蚀工艺	234
8.9	概述和展望	238
	参考文献	239
	习 题	242
第九章	金属化	243
9.1	引言	243
9.2	物理气相淀积法	248
9.3	金属化中遇到的问题	252
9.4	金属化的失效	256
9.5	用于栅极和互连的硅化物	260
9.6	腐蚀和键合	266
9.7	概述和展望	266
	参考文献	267
	习 题	270
第十章	工艺模拟	271
10.1	引言	271
10.2	外延	271
10.3	离子注入	274
10.4	扩散和氧化	279
10.5	光刻	287
10.6	刻蚀和淀积	300
10.7	器件模拟	307
10.8	概述和展望	308
	参考文献	308

习 题	313
第十一章 超大规模集成电路工艺集成	314
11.1 引言	314
11.2 集成电路工艺的基本考虑	315
11.3 双极型集成电路工艺	317
11.4 NMOS 集成电路工艺	325
11.5 互补 MOS 集成电路工艺	337
11.6 超大规模集成电路的微型化	345
11.7 现代集成电路的制造	349
11.8 概述和展望	351
参考文献	351
习 题	357
第十二章 诊断技术	359
12.1 引言	359
12.2 形态测定	360
12.3 化学分析	367
12.4 晶体结构和力学性能	377
12.5 电法勘测	382
12.6 概述和展望	386
参考文献	386
习 题	390
第十三章 装配技术和管壳封装	392
13.1 引言	392
13.2 硅片的分割和挑选	392
13.3 管芯互连	393
13.4 管壳类型和制造工艺	404
13.5 封装的专题考虑	411
13.6 管壳应用的考虑	413
13.7 概述和展望	419
参考文献	420
习 题	424
第十四章 成品率和可靠性	425
14.1 引言	425
14.2 超大规模集成电路成品率亏损的机理	425
14.3 成品率亏损机理的模型化	427
14.4 超大规模集成电路的可靠性要求	433
14.5 失效分布、可靠性和失效率的数学	435
14.6 常用的分布函数	436
14.7 加速试验	442

14.8 失效机理·····	446
14.9 概述和展望·····	449
参考文献·····	449
习 题·····	451
附录(一) 硅的性质·····	453
附录(二) 符号表·····	454
附录(三) 国际单位符号·····	455
附录(四) 物理常数·····	456

绪 论

电子工业发展

近年来美国电子工业发展很快, 工厂的销售额为六十年代初期的十倍(见图1, 曲线(a)^{[1], [2]}). 电子产品销售额在1981年为1140亿美元, 预计平均年增长率为15%, 到1990年将达4000亿美元。而集成电路(IC)的市场增长率又高于电子工业(见图1, 曲线(b))。在美国集成电路销售额1981年为66亿美元, 预计年增长率为25%, 到1990年将达500亿美元。这种市场增长的动力来自电子产品的大量普及和集成电路工艺技术的不断突破。电子工业的世界市场(约为美国的两倍)将以差不多的速率增长。十年内, 它将与汽车、化学和钢铁工业的销售额相匹敌。

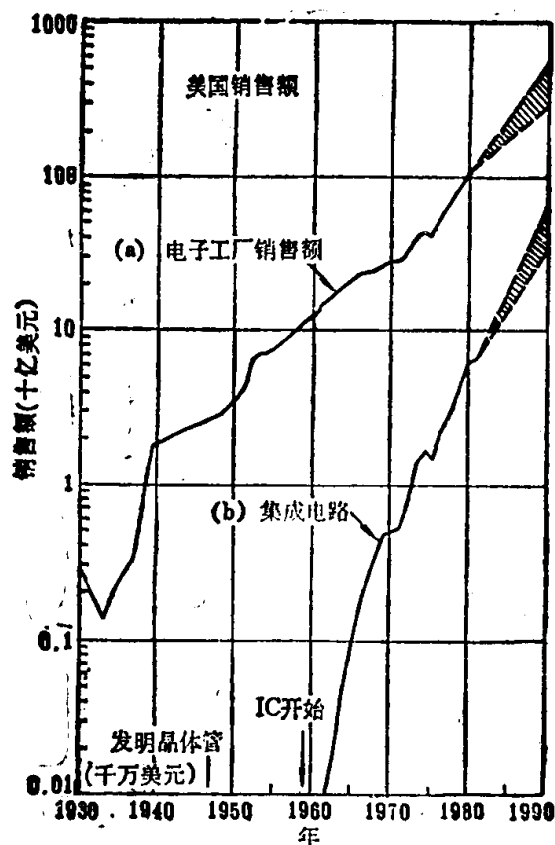


图1 (a) 美国在1930到1981年间52年内和预计到1990年的电子工业销售额。
(b) 美国在1962到1981年间20年内和预计到1990年的集成电路市场。(引自文献[1]和[2])

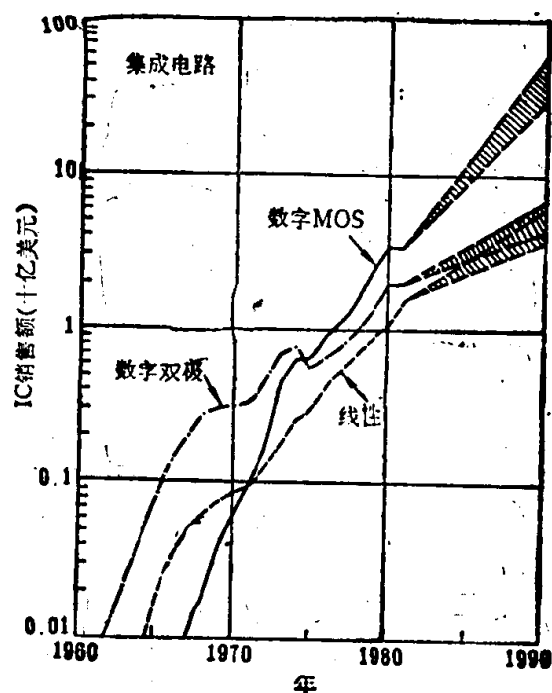


图2 美国主要几种集成电路的销售额。
(引自文献[1])

图2中给出几种主要集成电路品种的销售额和近年来的变化^[1]。六十年代集成电路市场主要为双极型晶体管。但是, 从1975年开始, 数字MOS集成电路已经超过了双极型。现在, 甚至双极型晶体管所固有的速度优势也正在受到MOSFET的挑战。因为数字MOS集成电路在器件小型化、低功耗和高成品率方面的优点将使它在1990年前支配集成电路市

场并占有全部半导体器件销售额的大部分，因此，本书着重于与 MOS 有关的超大规模集成电路工艺。

器件微型化

图 3 中曲线 (a) 表明每个集成电路芯片上的元件数作指数增加。其集成度已从小规模集成 (SSI) 发展到中规模集成 (MSI)，大规模集成 (LSI) 和最后到超大规模集成 (VLSI)。在超大规模集成电路中每芯片有 10^5 或更多的元件。虽然近年来由于在完善、设计和生产复杂芯

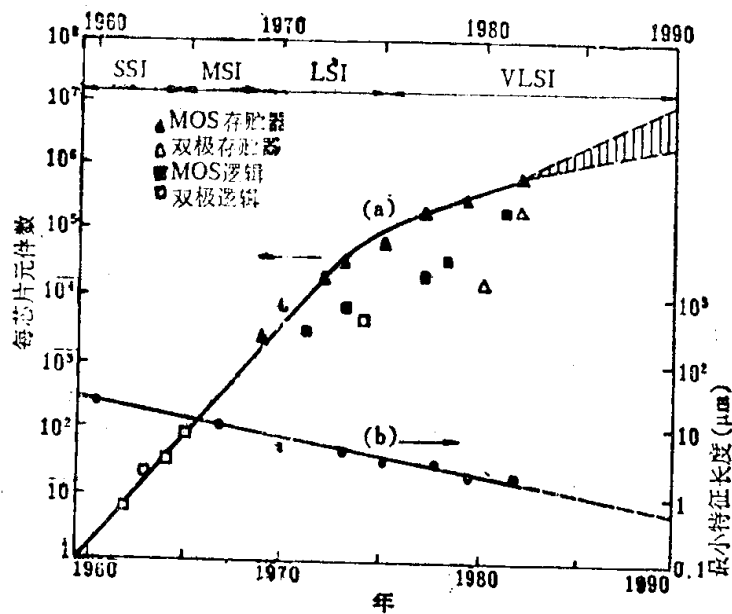


图 3 (a) 每一集成电路芯片上的元件数作指数增加。(引自文献 [4]) (b) 器件的最小尺寸作指数下降。

片方面的困难使增长率有所下降，但是在 1990 年以前每个芯片上超过一百万个器件的集成度将可以实现。

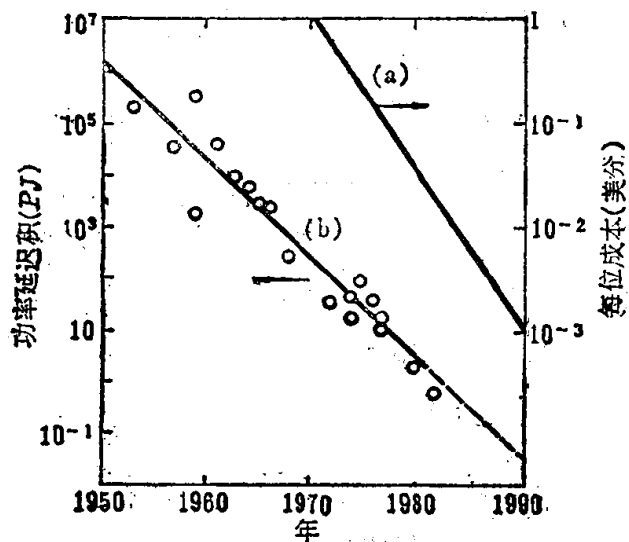


图 4 (a) RAM 每位成本的下降。(引自文献 [5])
(b) 每逻辑门功率-延迟积随年度之变化。
(引自文献 [6])

为了实现这样高的集成度，最重要的因素是不断降低最小器件尺寸(见图 3，曲线(b))。自 1960 年以来其年缩小率为 13%。以此速率发展，其最小特征长度将从现在的 $2\mu\text{m}$ 缩小到十年后的 $0.5\mu\text{m}$ 。

器件微型化导致每单元功能成本的下降以及性能的改善。图 4 中曲线 (a) 给出成本下降的实例。RAM 芯片每两年中每一位的成本下降 50%^[5]。到 1990 年对一兆位存储器芯片每位成本可低到 0.001 美分。逻辑电路的价格也会有类似的下降。

因为器件尺寸的减小，MOSFET 的本征开关时间也线性下降(本征延迟近似地为沟道长

度乘以载流子速度)。自1960年至今,器件速度已改善了两个数量级。更高的速度将要牺牲集成电路的功能通量速率。将来,数字集成电路将能以每秒千兆位的速度进行数据处理,数字计算和信号调节。微小型化的另一个优点是使功耗下降。由于器件变小,功耗也下降。所以,器件微小型化也能降低每一次开关需要的能量。图4中曲线(b)表明了这一能量的变化,称为功耗-延迟积^[6]。每逻辑门的能量耗散自1960年以来已下降了四个数量级以上。

信息时代

图5给出美国电子工业的四个时期的变化。每一时期显示出一常规的寿命周期特征^[7](即从孕育到高速发展,到饱和以至最后下降)。1906年真空管发展和1947年晶体管发明^[8]打开了电子线路设计的领域。1959年集成电路的发展^[9]又导致新一代的逻辑电路。自1975年超大规模集成电路出现以来,这一领域的前沿又进入了集成电路的系统组织和相关的软件设计。

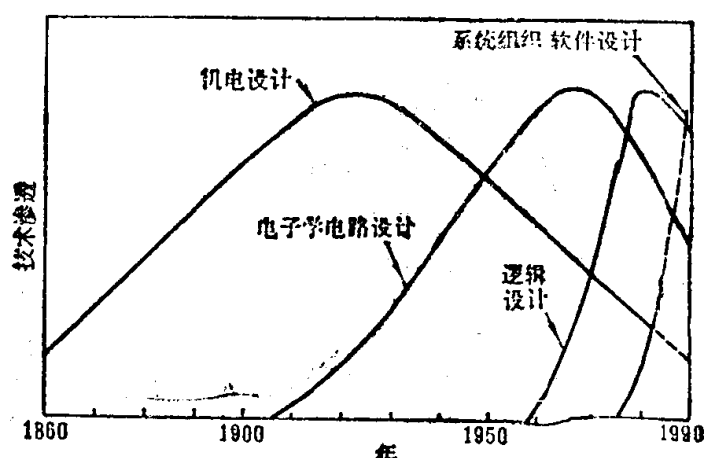


图5 美国电子工业四个时期工业品中的技术渗透随年度之变化。(引自文献[7])

将要制造出很多定向系统(system-oriented)的超大规模集成电路芯片,如语言分析/识别和存贮电路以满足用来应付信息时代日益增长的复杂性对尖端电子系统的大量市场需要^{[10], [11]}。在这个时代,我们大部分工作人员可称为“信息工作者”,他们将收集、产生、处理、传布和使用信息。图6给出美国整个工作人员中的组成变化。1906年以前,最大的部分是农业。下一时期至五十年代中期主要是工业。现在,主要是信息,约占50%。在欧洲和

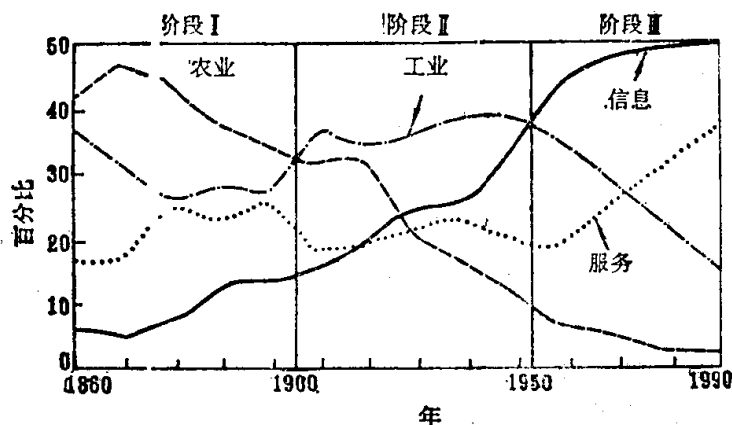


图6 美国不同阶段整个工作人员之组成变化。(引自文献[10])

日本信息工作者现约占 35~40%，估计本世纪末可达 50%^[12]。超大规模集成电路的进展将对世界经济发生很大影响，因为它是信息时代的关键技术。

本书的组织

图 7 中给出了本书中十四章的组织体系。第一章介绍晶体生长和片子处理。超大规模集成电路工艺与硅超大规模集成电路工艺是同义的。由于硅材料具有合适的禁带宽度，稳定的氧化物和在自然界的丰富储量使它在未来的一段时期内，没有其他的半导体在超大规模集成电路应用中会成为它的严重挑战者(硅的一些主要性质列于附录 A)。硅片制备完成，我们就进入从第二章到第九章中所介绍的片子加工工艺，如图 7 的片子形圆圈内所示。每一章讨论一个专门工序。当然许多工序在集成电路制造中要重复多次，如光刻，干法刻蚀要重复五到十次。

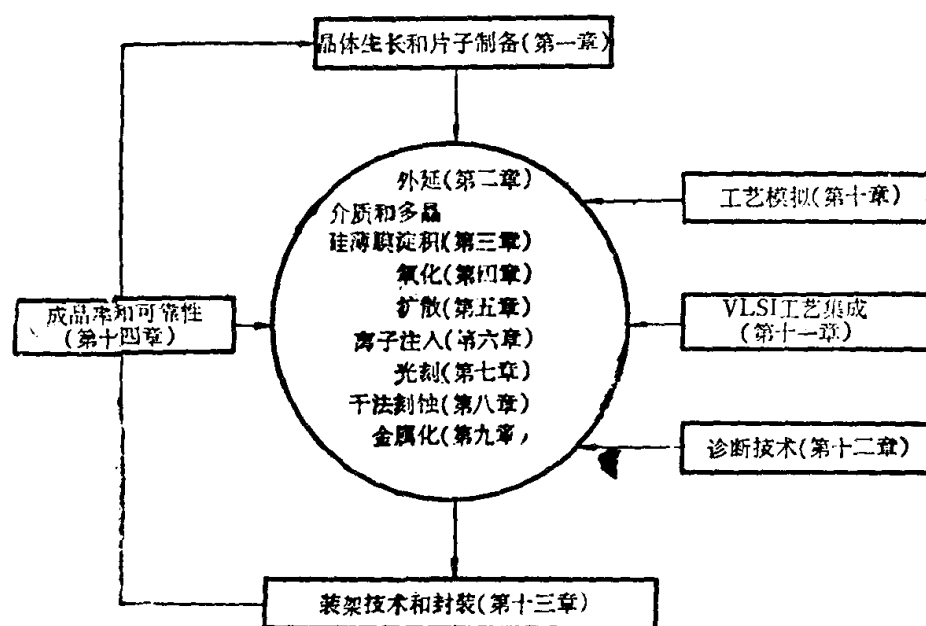


图 7 本书的组织

第十章介绍了从第二章至第九章中全部主要工序的工艺模拟。工艺模拟是辅助工艺发展的很好方法，因为与实验方法相比较，它既省钱又省时。工艺模拟与器件和电路模拟一起能提供一个总的设计系统，它能联机(on-line)进行工艺设计和模拟以估计所需的器件和电路的参数灵敏度，以方便电路设计和版面布局。

第二章至第九章中的各个工艺在第十一章中结合在一起形成器件和逻辑电路。第十一章介绍了三个最主要的集成电路系列：双极型集成电路，NMOS(N沟道 MOSFET)集成电路和 CMOS(互补 MOSFET)集成电路。随着尺寸减小和电路集成度增加，十分需要可用来进行工艺诊断的先进方法。第十二章给出许多先进的诊断技术，如形态检查用的扫描电镜和透射电镜，化学分析用的俄歇电子谱和用于结构分析的 X 射线衍射仪。

全部工艺完成后，片子要进行测试，合格的片子便去封装。第十三章介绍了超大规模集成电路芯片的装配和封装。第十四章介绍了每一工序的成品率和封装好的集成电路的可靠性。随着器件尺寸接近 $1\mu\text{m}$ ，超大规模集成电路工艺越加自动化，每一工序参数均要严格控制。在生产中，为提高其成品率和可靠性，从晶体生长到器件封装每一步工序均有很多细致工作要做。

为使本书中符号简化,有时用同样符号表示不同意义。例如,第一章中的 S 表示四探针距离,在第七章中则表示光刻胶感光度,而在第十四章中又表示失效图中的斜率。但是在每一章中一个符号仅表示一个意义。在它们第一次出现时给定。因为在全书中有许多符号都具有同样或类似的意义,所以在附录B中把它们综合列出。

现在,超大规模集成电路发展极快,文章发表数量(即在题头或索引为“超大规模集成电路”的文章)从1975年的实际上为零增加到1981年超过1000篇,其平均年增长率为300%!注意,许多课题象光刻和工艺模拟仍在努力研究之中。它们最终的潜在能力尚未充分阐明。本书中的材料只可看作为一个基础。在每一章末尾中列出的参考文献可以提供更多的信息。

参 考 文 献

- [1] *Electronic Market Data Book 1982*, Electronic Industries Association, Washington, D. C. 1982.
- [2] "World Markets Forecast for 1982," *Electronics*, 55, No. 1, 121 (1982).
- [3] "Ten-Year Worldwide Forecast for Electronic Equipment and Components," *Electronic Business*, p. 92 (February 1981).
- [4] G. Moore, "VLSI, What Does the Future Hold," *Electron. Aust.*, 42, 14 (1980).
- [5] R. N. Noyce, "Microelectronics," in T. Forester, Ed., *The Microelectronics Revolution*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1981, p. 29.
- [6] R. W. Keyes, "Limitations of Small Devices and Large Systems," in N. G. Einspruch, Ed., *VLSI Electronics*, Academic, New York, 1981, Vol. 1, p. 186.
- [7] J. M. Connell, "Forecasting a New Generation of Electronic Components," *Digest IEEE Spring Compcon.*, 81, 14 (1981).
- [8] W. Shockley, "The Path to the Conception of the Junction Transistor," *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-23, 597 (1976).
- [9] J. S. Kilby, "Invention of the Integrated Circuits," *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-23, 648 (1976).
- [10] A. L. Robinson, "Electronics and Employment: Displacement Effects," in T. Forester, Ed., *The Microelectronics Revolution*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1981, p. 318.
- [11] J. S. Mayo, "Technology Requirements of the Information Age," *Bell Lab. Rec.*, 60, 55 (1982).
- [12] D. Kimbel, *Microelectronics, Productivity and Employment*, Organization for Economic Coöperational Development, Paris, 1981, p. 15.

第一章 晶体生长和片子制备

C. W. PEARCE

1.1 引言

在自然界以硅酸盐和二氧化硅形式存在的硅是电子工业中最重要的半导体原材料。今天，以硅为基体的器件占世界销售的半导体器件的98%以上。硅是周期表中最熟悉的元素之一。在已发表的文章中以硅为检索词的参考文献有25000篇以上。附录A中给出它的一些有用的常数^{[1], [2]}。硅也是几种主要工业，如玻璃和宝石工业的重要元素。硅的商业价值部分是由于它在自然界中大量存在的矿物的利用。二氧化硅是制造玻璃及其有关产品的主要原料，而某些硅酸盐更可高度评价作为半贵重宝石，如石榴石，锆石和翡翠石。地壳重量的25%由它组成，仅次于氧占第二位。

有如在使用“硅芯片”术语那样，虽然通常认为硅与固体电子学是同义的，但是硅的矿物形式在真空电子学中已被使用(二氧化硅就是电子管的管壳)。云母是一种硅酸盐可作绝缘材料和电容器介质。另一种硅酸盐石英，仍被用作测定频率的元件和无源滤波器。

固体电子学从巴丁(Bardeen)、布劳顿(Bratton)和肖克莱(Shockley)发明双极型晶体管效应起开始^[3]。在五十年代初期，工艺进展主要是基于锗作为半导体材料。可是，由于锗有呈现很大的结漏电流的倾向，在一些应用中不宜采用。原因是锗的禁带较窄(0.66 eV)。因此硅(1.1 eV)实际上几乎全部代替了锗作为固体器件制造使用的材料。硅器件可以运行到达150℃而锗为100℃。

导致这样材料替换的另一理由是基于高质量热生长的二氧化硅的平面工艺技术的成功。二氧化锗溶于水不适宜于器件应用。锗的本征电阻率为 $47\Omega\text{-cm}$ ，这难以制造高击穿电压的整流器。相比之下，硅的本征电阻率为 $230,000\Omega\text{-cm}$ ，可用它制造高压整流器和红外传感器件。最后，从经济上考虑，电子级锗的价格是硅的10倍。

类似的问题也妨碍着化合物半导体的广泛应用。如，在GaAs上就难以生长优质的氧化物。其中一种元素比另一种氧化速度快，就在界面上留下另一种元素的金属相。这种材料难以掺杂也不易得到晶体完美的大直径单晶。事实上，Ⅲ—Ⅴ族化合物半导体工艺的发展也部分地由于硅工艺的发展有关。

1.2 电子级硅

电子级硅(EGS)是高纯的多晶材料，也是制备单晶硅的原材料。电子级硅无疑是可常规应用的最纯的材料之一。最为关注的主要杂质是硼，碳和残余施主。纯电子级硅通常要求掺

• 7 •