



电子信息与电气学科规划教材·电子科学与技术专业

集成电路

制程设计与工艺仿真

刘睿强 袁 勇 林 涛 编著
李惠军 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息与电气学科规划教材·电子科学与技术专业

集成电路制程设计与工艺仿真

刘睿强 袁 勇 林 涛 编著

李惠军 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍当代集成电路设计的系统级前端、布局布线后端及工艺实现三大环节所构成的整体技术的发展,重点着眼于集成电路工艺过程的计算机仿真和计算机辅助设计,以及具体的工具软件 and 系统的使用。全书共 12 章,主要内容包括:常规集成平面工艺、集成工艺原理概要、超大规模集成工艺、一维工艺仿真综述、工艺仿真交互设置、工艺仿真模型设置、工艺仿真模拟精度、一维工艺仿真实例、集成工艺二维仿真、二维工艺仿真实现、现代可制造性设计、可制造性设计理念,并提供电子课件和习题解答。

本书可作为高等学校电子科学与技术、微电子、集成电路设计等专业的教材,也可供集成电路芯片制造领域的工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

集成电路制程设计与工艺仿真 / 刘睿强, 袁勇, 林涛编著. —北京: 电子工业出版社, 2011.3

电子信息与电气学科规划教材

ISBN 978-7-121-12022-0

I. ①集… II. ①刘… ②袁… ③林… III. ①集成电路—电路设计—高等学校—教材 ②集成电路—计算机仿真—高等学校—教材 IV. ①TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 200268 号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王羽佳

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.25 字数: 364.8 千字

印 次: 2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 29.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

当代集成电路设计大体分为顶层设计和底层设计两部分。顶层设计泛指系统级描述、仿真、综合与验证环节。底层设计又被称为 TCAD 设计层次,大体包括布局布线、版图设计与优化、互连设计及寄生参数提取、工艺级仿真及器件物理特性级模拟与验证。可见,底层设计知识与集成电路工艺制程关系密切,是微电子和集成电路设计相关专业学生必备的知识。

面对高速发展的微电子和集成电路设计技术,能使学生在在校期间就具备较全面的知识基础,并强化新技术、新手段、新工具及新理念的学习和实训锻炼,为科研和生产第一线提供人才储备,是当前高等学校的首要任务和重要课题。

本书由典型集成电路工艺原理和技术入手,引出集成电路制造工艺的计算机仿真技术,由浅入深地介绍一维、二维乃至三维工艺仿真技术的发展现状,基于当前国内高校普遍使用的集成电路工艺设计教学与仿真平台(SUPREM-2,山东大学孟尧微电子研发中心推出<http://www.sdmy.sdu.edu.cn>),重点介绍一维工艺仿真,并涵盖二维工艺仿真和 Synopsys 所推出的新一代 TCAD 设计工具等内容。本书重点介绍集成电路工艺的计算机仿真技术,但为使内容保持相对完整和与其他课程的衔接,也简单介绍了原理知识,如集成电路工艺原理和工艺模型等内容,读者可根据具体教学情况酌情取舍。

本书可作为普通高等学校电子科学与技术、微电子技术、集成电路设计与制造等专业的相关课程教材。又因本书定位口径宽、与芯片级设计及芯片产业现状结合紧密,故也供集成电路芯片设计与制造的科研单位和企业的工程技术人员学习、参考。

本课程的学习应在修完半导体物理、半导体器件物理、集成电路工艺原理等课程之后。本书配套免费电子课件、习题解答,请登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)注册下载。

本书第 1~8 章由刘睿强主笔,第 9、10 章由袁勇主笔,第 11、12 章由林涛主笔。山东大学信息工程学院教授、孟尧微电子研发中心主任李惠军教授在百忙之中对本书进行了审阅,提出了诸多修改意见,我们在此表示衷心感谢!

我们特别感谢重庆电子工程职业学院各级领导多年来对我们工作的关心、支持和帮助。在本书的写作和出版过程中,我们还得到了很多专家、学者和同仁的关心和帮助,在此一并向他们表示诚挚的谢意!

限于作者的水平及成书的时间关系,疏漏之处在所难免,望读者批评指正!

作 者

目 录

绪论	(1)
0-1 半导体及半导体工业的起源	(2)
0-2 半导体工业的发展规律	(3)
0-3 半导体技术向微电子技术的发展	(5)
0-4 当代微电子技术的发展特征	(7)
本章小结	(8)
习题	(8)
第1章 半导体材料及制备	(9)
1.1 半导体材料及半导体材料的特性	(9)
1.1.1 半导体材料的特征与属性	(10)
1.1.2 半导体材料硅的结构特征	(10)
1.2 半导体材料的冶炼及单晶制备	(11)
1.3 半导体硅材料的提纯技术	(13)
1.3.1 精馏提纯 SiCl_4 技术及其提纯装置	(13)
1.3.2 精馏提纯 SiCl_4 的基本原理	(14)
1.4 半导体单晶材料的制备	(15)
1.5 半导体单晶制备过程中的晶体缺陷	(17)
本章小结	(19)
习题	(20)
第2章 集成工艺及原理	(21)
2.1 常规集成电路制造技术基础	(21)
2.1.1 常规双极性晶体管的工艺结构	(21)
2.1.2 常规双极性晶体管平面工艺流程	(23)
2.1.3 常规 PN 结隔离集成电路平面工艺流程	(24)
2.2 外延生长技术	(25)
2.3 常规硅气相外延生长过程的动力学原理	(27)
2.4 氧化介质制备技术	(31)
2.5 半导体高温掺杂技术	(35)
2.6 常规高温热扩散的数学描述	(39)
2.6.1 恒定表面源扩散问题的数学分析	(40)
2.6.2 有限表面源扩散问题的数学分析	(41)
2.7 杂质热扩散及热迁移工艺模型	(42)
2.8 离子注入低温掺杂技术	(44)

本章小结	(47)
习题	(48)
第 3 章 超大规模集成工艺	(50)
3.1 当代微电子技术的技术进步	(50)
3.2 当代超深亚微米级层次的技术特征	(51)
3.3 超深亚微米层次下的小尺寸效应	(51)
3.4 典型超深亚微米 CMOS 制造工艺	(53)
3.5 超深亚微米 CMOS 工艺技术模块简介	(57)
本章小结	(65)
习题	(66)
第 4 章 一维工艺仿真综述	(67)
4.1 集成电路工艺仿真技术	(69)
4.2 一维工艺仿真系统 SUPREM-2	(70)
4.3 SUPREM-2 的建模	(72)
本章小结	(74)
习题	(75)
第 5 章 工艺仿真交互设置	(77)
5.1 SUPREM-2 工艺仿真输入卡的设置规范	(77)
5.2 SUPREM-2 工艺模拟卡的卡序设置	(78)
5.3 SUPREM-2 仿真系统的卡语句设置	(79)
5.4 输出/输入类卡语句的设置	(81)
5.5 工艺步骤类卡语句的设置	(83)
5.6 工艺模型类卡语句的设置	(86)
本章小结	(87)
习题	(88)
第 6 章 工艺模拟系统模型设置	(89)
6.1 系统模型的类型及参数分类	(89)
6.1.1 元素模型	(89)
6.1.2 氧化模型	(90)
6.1.3 外延模型	(91)
6.1.4 特殊用途模型	(91)
6.2 SUPREM-2 工艺模拟系统所设置的默认参数值	(92)
本章小结	(94)
习题	(94)
第 7 章 工艺模拟精度的调试	(95)
7.1 工艺模拟输入卡模型修改语句	(95)
7.2 工艺模拟精度的调试实验	(95)
7.2.1 工艺模拟精度调试实验的设置	(95)
7.2.2 工艺模拟精度调试实验举例	(96)

本章小结	(100)
习题	(100)
第 8 章 一维工艺仿真实例	(102)
8.1 纵向 NPN 管芯工序全工艺模拟	(102)
8.1.1 工艺制程与模拟卡段的对应描述	(102)
8.1.2 纵向 NPN 工艺制程的标准模拟卡文件	(107)
8.1.3 纵向 NPN 工艺制程模拟的标准输出	(110)
8.2 PMOS 结构栅氧工艺模拟实例	(110)
8.3 典型的 NPN 分立三极管工艺模拟	(114)
8.4 PMOS 场效应器件源漏扩散模拟	(114)
8.5 可制造性设计实例一	(115)
8.6 可制造性设计实例二	(116)
8.7 可制造性设计实例三	(117)
8.8 可制造性设计实例四	(119)
本章小结	(120)
习题	(120)
第 9 章 集成电路工艺二维仿真	(122)
9.1 集成电路工艺二维仿真系统	(122)
9.1.1 TSUPREM-4 系统概述	(122)
9.1.2 TSUPREM-4 仿真系统剖析	(123)
9.1.3 TSUPREM-4 采用的数值算法	(125)
9.2 TSUPREM-4 仿真系统的运行	(126)
9.3 TSUPREM-4 仿真系统的人机交互语言	(126)
本章小结	(132)
习题	(133)
第 10 章 二维工艺仿真实例	(134)
10.1 二维选择性定域刻蚀的实现	(134)
本章小结	(149)
习题	(149)
第 11 章 可制造性设计工具	(151)
11.1 新一代集成工艺仿真系统 Sentaurus Process	(152)
11.1.1 Sentaurus Process 简介	(152)
11.1.2 Sentaurus Process 的安装及启动	(153)
11.1.3 创建 Sentaurus Process 批处理卡命令文件	(153)
11.1.4 Sentaurus Process 批处理文件执行的主要命令语句	(154)
11.1.5 Sentaurus Process 所设置的文件类型	(157)
11.2 Sentaurus Process 的仿真功能及交互工具	(158)
11.2.1 Sentaurus Process 的仿真领域	(158)
11.2.2 Sentaurus Process 提供的数据库浏览器	(159)

11.2.3	Sentaurus Process 图形输出结果调阅工具	(160)
11.3	Sentaurus Process 所收入的近代模型	(161)
11.3.1	Sentaurus Process 中的离子注入模型	(162)
11.3.2	Sentaurus Process 中的小尺寸扩散模型	(163)
11.3.3	Sentaurus Process 对局部微机械应力变化描述的建模	(163)
11.3.4	Sentaurus Process 中基于原子动力学的蒙特卡罗扩散模型	(164)
11.3.5	Sentaurus Process 中的氧化模型	(164)
11.4	Sentaurus Process 工艺仿真实例	(165)
11.4.1	工艺制程设计方案	(165)
11.4.2	工艺仿真卡命令文件的编写	(168)
11.4.3	仿真实例卡命令文件范本	(177)
11.4.4	工艺制程仿真结果	(181)
11.4.5	工艺仿真结果的分析	(183)
11.5	关于 Sentaurus Structure Editor 器件结构生成器	(184)
11.5.1	Sentaurus Structure Editor 概述	(184)
11.5.2	使用 SDE 完成由 Process 到 Device 的接口过渡	(186)
11.5.3	使用 Sentaurus Structure Editor 创建新的器件结构	(190)
	本章小结	(194)
	习题	(194)
第 12 章	可制造性设计理念	(196)
12.1	纳米级 IC 可制造性设计理念	(197)
12.1.1	DFM 技术的实现流程	(197)
12.1.2	DFM 与工艺可变性、光刻之间的关系	(198)
12.1.3	DFM 工具的发展	(200)
12.2	提高可制造性良品率的 OPC 技术	(201)
12.2.1	光刻技术的现状与发展概况	(201)
12.2.2	关于光学邻近效应	(202)
12.2.3	光学邻近效应校正技术	(203)
12.2.4	用于实现光刻校正的工具软件	(207)
12.3	Synopsys 可制造性设计解决方案	(210)
12.3.1	良品率设计分析工具套装	(211)
12.3.2	掩膜综合工具	(212)
12.3.3	掩膜数据准备工具 CATS™	(213)
12.3.4	光刻验证及光刻规则检查系统	(213)
12.3.5	虚拟光掩膜步进曝光模拟系统	(214)
12.3.6	TCAD 可制造性设计工具	(214)
12.3.7	制造良品率的管理工具	(217)
	本章小结	(217)
	习题	(218)
	参考文献	(219)

绪 论

20 世纪 40 年代中期，科学家们就对半导体材料发生了浓厚的兴趣。第一只晶体管的发明就预示着晶体管在不远的将来会取代当时还处于鼎盛时期的电子器件——真空电子管。如图 0-1 所示，图中是一只硕大的、玻璃壳封装的大功率真空电子管，图的右下角是一只与其电学参数十分接近的大功率晶体管，将两者放在一起，可谓对比强烈。

以各类二极管和各类三极管为代表的晶体管（统称为半导体器件）、集成电路就是以硅片为载体（通常称为衬底），经过完整而冗长的精密、微细加工而完成的，如图 0-2 所示。在现代集成电路制造工艺原理课程中，半导体硅材料始终是主角。硅在地球上的蕴藏量是极为丰富的。由自然界采集来富含硅成分的化合物，经过产业化物化精馏提纯而得到高纯度的多晶硅。以高纯多晶硅为原料，经加工、掺杂得到符合集成电路制造要求的单晶硅硅棒。再将单晶硅棒按特定的晶体取向要求切割成薄片，这就是我们通常所说的硅片。

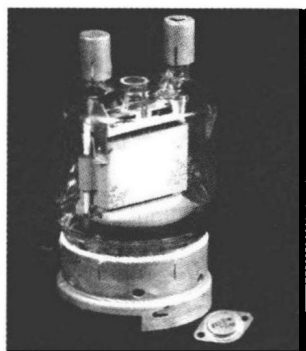


图 0-1 电子管与晶体管

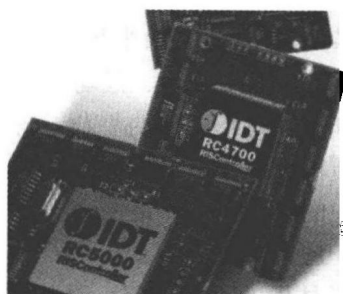


图 0-2 各类集成电路

1947 年 12 月 23 日，世界上第一只晶体管诞生，主要发明者（见图 0-3）是美国贝尔实验室的三位半导体物理学家：威廉·肖克莱、沃尔特·布拉顿和约翰·巴丁。1956 年，他们因此项重大发明而被授予诺贝尔物理学奖。图 0-4 所示为第一只晶体管的实物照片。



图 0-3 由左至右为巴丁、肖克莱和布拉顿

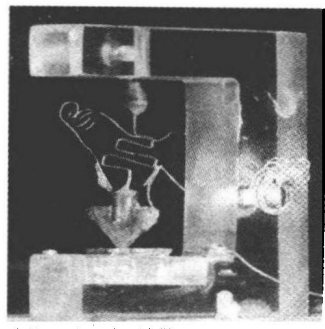


图 0-4 第一只晶体管的实物照片

晶体管很快成为计算机“理想的神经细胞”。在此之前，只有美国的军方和大型公司才有实力拥有像“电子管数字化计算机”这样的计算机。他们必须专门为它建造大型机房、配置极为复杂的工作条件，以便使这个庞然大物（电子管数字化计算机）能够正常运转。难以想象，“电子管数字化计算机”工作时犹如一头饥饿的美洲虎（十分惊恐而暴躁）在咆哮。开动并使它保持正常运行需要消耗大量的能量。有了晶体管，特别是有了能够包容数百万只晶体管的集成电路芯片的问世，计算机在奇迹般“瘦身”的同时，功能和性能更让世人为之惊奇。如今，中学生可以在他们的书包里携带着内嵌超大规模集成电路微处理器的、远比当时的“电子管数字化计算机”先进得多的计算器，学生们可以将其置于课桌之上，只需给它配上几节电池即可正常工作。

0-1 半导体及半导体工业的起源

第一只晶体管的问世，诱发了人们对半导体材料和半导体材料的特性的研究热潮。具有各种结构特征的半导体晶体管相继研究成功。特别是逐步完善的“硅晶体管外延平面工艺”使半导体器件的性能日趋完善。接着，将分立器件集成化、缩小器件的结构尺寸、降低器件的功耗摆在了科学家们的面前。特别是计算机技术对半导体器件的要求，一直是半导体工业高速发展的技术驱动力。可以说，半导体产业是伴随着计算机技术的发展而发展起来的。集成电路也由小规模、中规模，逐步发展到大规模和超大规模。

当代的微电子产业，由半导体工业过渡而来。集成电路正是追求着高集成度、高速度、短的开发周期和低成本、低功耗。力求更好地解决在适应电子设备的小型化要求与不断增加的功耗和布线延迟之间的复杂矛盾。

图 0-5 所示为第一只晶体管的发明者肖克莱在讲课的情景，可见，肖克莱先生在向听众讲授半导体中的能带理论。正是这能带理论使半导体理论的研究步步深入，并取得了一系列重大的理论和应用成果。

随着科学技术的不断发展，晶体管又不能满足电子装置小型化、重量轻的要求。将分立元器件“集成”化的奢望又在吸引着科学家们。随着半导体制造工艺的不断成熟，第一块集成电路很快问世了。1958 年，第一块集成电路带来了一场震撼世界的技术革命。计算机、卫星、导弹、通信设备、家用电器上都离不开集成电路。它从根本上改变了我们的生活方式。集成电路的基础材料——硅也一跃成为半导体材料中最耀眼的明星。图 0-6 所示为第一枚集成电路的实物照片。

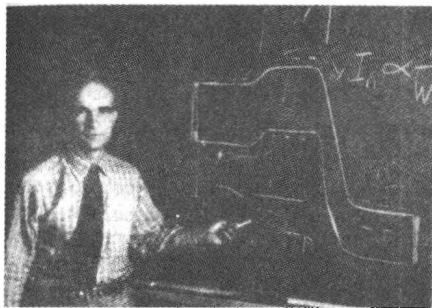


图 0-5 肖克莱讲述半导体能带结构

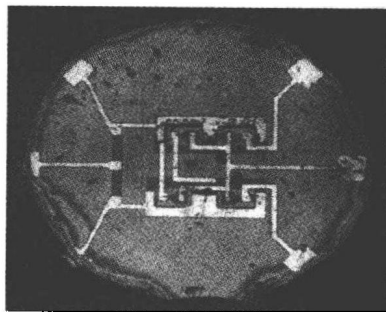


图 0-6 第一枚集成电路的实物照片

Pentium3 微处理器集成了约 2800 万只晶体管,而 Pentium4 微处理器则集成了约 4200 万只晶体管。Pentium4 微处理器比 Pentium3 微处理器有着更高的工作速度。回顾集成电路制造工业的发展历史,有着许多令人深思的东西值得我们去回味。

1965 年,戈登·摩尔(Moore, Intel 公司的创始人之一)注意到工程师们(其中大多数成为 Intel 公司的第一批雇员)取得了能使集成电路上单位面积内晶体管数目每年增加一倍的成绩。根据他对半导体行业和集成电路制造工艺技术及其发展趋势的了解与把握,他提出了被人们称为摩尔定律(Moore Law)的构想——这种增长速度将在未来 10 年左右的时间继续下去,而随着晶体管尺寸的进一步缩小和集成电路集成度的不断增加,势必使集成电路变得更加便宜,功能更强,模块化程度更高。50 多年过去了,半导体工业的发展突破了一个又一个看似不可能跨越的技术瓶颈,神奇地遵循着摩尔定律。图 0-7 和图 0-8 分别是 1970 年和 1971 年推出的大规模集成电路管芯照片。

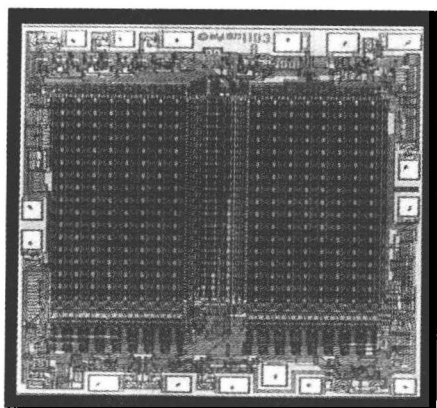


图 0-7 第一块 1103DRAM 芯片(1970)

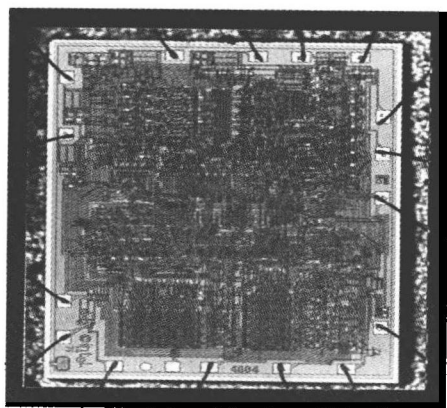


图 0-8 第一块 4004 微处理器(1971)

0-2 半导体工业的发展规律

摩尔定律并不是科学界或自然界的一个定律,它只是对以往半导体业界技术规律的一种归纳和经验总结。摩尔定律描述了由不断改进的半导体制造工艺技术所带来的指数级增长的独特趋势和规律。摩尔定律首次发表,是在摩尔为美国 Electronics 杂志 35 周年庆典撰写的一篇文章里。时至 1975 年,半导体工艺技术的迅猛发展产生出超乎寻常的技术更新和技术进步,使得晶圆管芯的集成度一度超出摩尔的预言。于是,摩尔将翻倍的周期调整到了 24 个月,以给半导体技术有可能越发复杂而接近技术极限留下一定的空间。20 世纪 80 年代末,这个时间最终被确定为 18 个月。毫无疑问,在过去的 40 年里,摩尔定律起到了推动微电子技术科技进步的作用。

摩尔定律是一种总是具有滞后特征、人为既定的所谓定律。以它来预测未来是没有实际意义的。它只能是对过去技术规律和技术总结的一种数学抽象,以此抽象转化为技术成就的肯定和技术驱动力。我们可以以微电子技术发展进程中的个例来阐述以上思想。例如,传统的光刻技术正在日益成为半导体集成电路制造工艺的技术瓶颈。在 $0.18\sim 0.13\mu\text{m}$ 的工艺转换过程中,各大集成电路芯片制造厂商都碰到了很多困难(如现阶段 CPU 制造过程中晶

体管本身存在突出的漏电流问题)。这一技术障碍导致了半导体集成电路芯片价格的攀升。摩尔定律因此而面临严峻的挑战,这是不足为怪的。

图 0-9 所示为 Intel 公司推出的 Pentium 4 微处理器芯片。这一款微处理器芯片的特征尺寸是 $0.18\mu\text{m}$ (使用 $0.18\mu\text{m}$ 工艺),主频为 1.7GHz ,由 4200 万只晶体管组成。

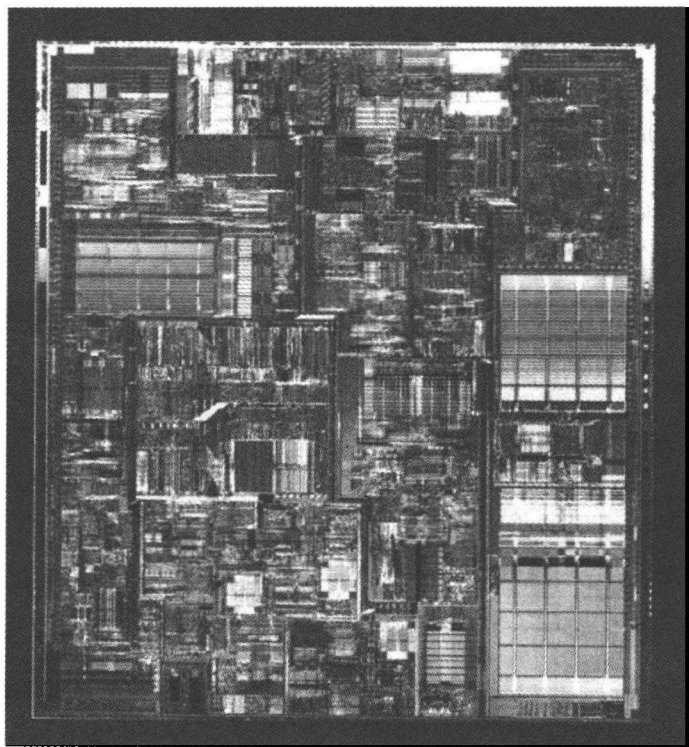


图 0-9 Pentium 4 微处理器芯片

显然,制约集成电路制造工艺技术的重要障碍之一是所谓的光刻技术。实现光刻技术的光刻工艺是 IC 制造的关键工序之一。微处理器(CPU)上复杂的元器件排布将稠密到连紫外激光也无法解决的程度。由于无法找到能够对更短波长的光吸收较少的特殊材料来做聚焦透镜,因此,业界必须找到一种新的方法克服这一障碍,以保证集成电路产业的稳定持续发展。

在未来的 15 年,半导体、微电子产业仍然是决定信息产业竞争力的根本所在。硅技术作为半导体、微电子技术的核心技术不会受到太大的威胁。迄今为止,强劲发展的仍是微细化技术。但微细化技术并非决定一切,还有待于电路级的仿真与验证技术、电路的分析与测试技术、器件级仿真技术、工艺级仿真技术、器件设计技术、整体工艺制造水平及封装技术的突破性进展和提高。

半导体、微电子技术的发展已历经半个多世纪,这期间,主要的技术驱动因素是计算机发展的技术需求。微电子产业伴随着计算机产业的成长而成长。近年来,半导体产业的技术牵引因素正从 PC(个人计算机)变为数字化信息家电,半导体产业所更为关注的器件也从计算机专用电路转向信息家电所需要的系统芯片。

电子工业在过去 50 年里得到了迅速的发展,这一发展一直为微电子学革命所驱动。

20 世纪 60 年代初,在一片半导体基片上制作几只晶体管,则被认为是划时代的。当时的数字计算机体积庞大,运算速度又极慢,而且价格昂贵。

21 世纪是信息时代,是新材料和先进技术迅速发展和广泛应用的时代,是人类向太空、海洋、地球内部不断拓展的时代,是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的时代。科学技术的发展、新技术的不断涌现,必将引发新的产业革命。

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科学研究方面都大大加快了发展的速度,并已经成为国民经济发展的支柱产业之一。完全可以预言,21 世纪将是微电子技术与产业持续、高速发展的新世纪。而微电子技术领域的技术核心是微电子晶圆、芯片的设计与制造业,也可以将微电子制造业视为微电子技术领域中的战略性基础产业。

0-3 半导体技术向微电子技术的发展

电子技术的发展是以电子器件的发展而发展起来的。近百年来,电子器件的发展历经了 4 个阶段的更新换代。图 0-10 所示为电子技术发展的 4 个阶段。



图 0-10 电子技术发展的 4 个阶段

可以说,历次变革都引发了电子技术和信息技术的革命。以下以时间为序简述电子器件发展的历程。1906 年,第一只电子管诞生;1912 年前后,电子管的制造日趋成熟,引发了无线电技术的发展;1918 年前后,发现了半导体材料;1920 年,发现半导体材料所具有的光敏特性;1924 年,发现半导体与金属接触时具有的整流特性;1932 年前后,运用量子学说建立的能带理论研究半导体现象;1940 年,对半导体的理论研究有文章成果发表;1943 年,美国贝尔实验室研制出硅点接触整流二极管;1943 年前后,电子管已成为电信息处理和传输设备的主体。

1945 年,第一台电子管电子数字积分计算机诞生,其英文缩写为 ENIAC,见图 0-11。ENIAC 的主要研发人员为美国宾夕法尼亚大学物理学家莫克力、美国宾夕法尼亚大学电子工程师埃克特。第一台电子管计算机使用了约 17 000 只电子管,电子元器件约 14 万只,机电继电器约 1500 只,运行功率约 150 千瓦(接近一台现代电动机车的牵引功率),总重量约 30 吨(由 23 个巨型控制柜和部分外部设备组成),计算速度为每秒完成 83 次加法运算,内存为 80 字节(640 bit),整个



图 0-11 ENIAC

计算机系统占地约 180 平方米。1947 年 12 月,肖克莱和巴丁等人发明了半导体锗点接触三极管;1948 年,提出半导体的 PN 结理论并制成硅结型晶体三极管;1955 年,硅结型场效应晶体管问世,1956 年,硅台面晶体管问世,肖克莱因在半导体领域的系列成就获诺贝尔奖,肖克莱半导体实验室成立;1957 年,美国仙童半导体公司成立^①(由肖克莱半导体实验

^① Intel 公司总裁葛洛夫即为仙童半导体公司的创始人之一。

室解体而成); 1958 年, 超高频硅微波晶体管问世; 1959 年, 气相制备单晶硅晶层的设想被提出并获成功, 硅与锗等主要半导体材料的氧化物特性数据被提出; 1960 年, 发明了硅外延平面结构的晶体管制造技术(硅外延平面工艺技术)。该技术虽经不断完善, 但其工艺技术的本质未有太大的变化, 仍沿用至今。硅外延平面工艺技术解决了此前无法解决的晶体管性能上的若干矛盾, 为晶体管由分立的模式转化为集成模式铺平了道路(在此之前的合金及台面工艺技术是无法解决的)。

1958 年, 制造成功了世界上第一块硅集成电路(仅集成了十几只晶体管和 5 个电阻, 而占有约 3 平方厘米的面积)。1963 年, 仙童半导体公司提出 MOS(金属-氧化物-半导体)单极性集成电路结构。1966 年, 美国贝尔实验室使用较为完善的硅外延平面工艺制成第一块公认的大规模集成电路(单位平方厘米的面积内集成了上千只晶体管和上百只电阻)。1969 年, 美国 Intel 公司宣告成立。1971 年, Intel 公司推出了世界上第一款微处理器 4004, 随后又推出了 8006 微处理器。1971 年, IBM 提出集成注入逻辑结构扩大双极性电路的集成度。图 0-12 所示为 Intel 公司总部一角。



图 0-12 Intel 公司总部一角

1972 年, Intel 公司推出了世界上第一块半导体存储器 1103(这是一块记忆容量为 1000bit 的 DRAM 动态随机存取存储器芯片)。同年, Intel 公司推出 8008 微处理器。1974 年, Intel 公司推出 8080 微处理器(这是一块处理速度为 4004 微处理器的 20 倍的新型微处理器管芯)。1976 年, Intel 公司推出 8085 微处理器; 1976 年, Zilog 公司推出 Z80 微处理器。上述两款微处理器功能极为接近, 竞争十分激烈。1978 年, Intel 公司推出 8086 微处理器。1980 年, Intel 公司推出 80186 微处理器。1982 年, Intel 公司推出 80286 微处理器。1985 年 7 月, Intel 公司推出 32 位的 80386 微处理器。1989

年 2 月, 第一款 80486 微处理器在 Intel 公司出炉。

以下是回忆第一款 80486 微处理器芯片在 Intel 公司开发成功的文字: 486 原本预定在 1988 年圣诞节之前完成, 只是设计实在是太复杂了, 即便是圣诞节, 整个研发小组(约 80 人)及整条 486 研制生产线(约 200 人)仍然是三班倒 24 小时轮值, 2 月 17 日, 第一款 80486 微处理器芯片被取出高温钝化炉, 立刻进行电极反刻, 经全面的测试通过后, 人们沸腾了, 办公室及生产线里处处可见五彩缤纷的圣诞树和彩灯。

1993 年, 推出了第一个 Pentium75 微处理器(0.8 μm 工艺); 1994 年, 推出了第一个 Pentium-II 微处理器(0.6 μm 工艺); 1995 年 11 月, Pentium-PRO 微处理器(0.35 μm 工艺)问世。

如今, 已经进入电子仪器发展的第四代——大规模集成电路和超大规模集成电路的发展阶段。由图 0-13 可以感受到集成电路晶圆生产的产业化氛围。

我们较多地使用“集成度”这个概念来表征集成电路制造的水平及其变化。集成度表示以单个管芯为单位, 所



图 0-13 芯片加工中的溅射工序

包含（或称为集成）的晶体管个数，可以反映出微电子集成电路产业中集成电路芯片设计与制造技术的水平。

那么，超大规模集成电路是个什么概念呢？超大规模集成电路的集成度界定为每单位管芯 1000 万只晶体管。严格地讲，表征集成电路设计与制造技术水平的指标除了集成度之外，还有单层表面电极布线的最小线宽和硅晶圆片的直径等表征参数。当代单层表面电极布线的最小线宽的水平为 $0.18\mu\text{m}$ ，或称为超深亚微米（VDSM, Very Deep SubMicron）；硅晶圆片的直径现已达 12inch，约为 300mm。

图 0-14 所示为近代提拉（以直拉单晶工艺获得）的大直径单晶硅，并显示出完整的直拉单晶体结构，晶柱的左端为晶颈端，晶柱的右端为晶尾端。现代硅（半导体）单晶及化合物半导体单晶，特别是硅（半导体）单晶显著地体现出超大直径、低缺陷密度、晶肩垂直度高、等晶精准、等晶生长段超长及晶尾过渡稳定等特点，体现了单晶的品相优良。图 0-14 所示的单晶硅晶柱样品符合以上提到的各个指标。

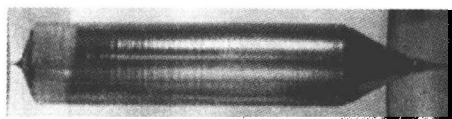


图 0-14 大直径单晶硅的晶颈（左端）至晶尾（右端）

0-4 当代微电子技术的发展特征

微电子集成电路设计技术和集成电路制造技术的发展速度令世人瞩目。当代微电子技术高速发展的显著特征表征着人类进入了“微电子时代”。

“微电子时代”的显著特点是众多高科技学科的互动且作用于集成电路的超大规模化上。正是这种互动的技术动力作用，使得集成电路以极快的速度经历了小规模集成电路（SSI, Small Scale Integrate）、大规模集成电路（LSI, Large Scale Integrate）、超大规模集成电路（VLSI, Very Large Scale Integrate）、特大规模集成电路（ULSI, Ultra Large Scale Integrate）等若干发展阶段。那么，ULSI（特大规模集成电路）反映在集成电路的集成度和制造工艺水准上是个什么概念呢？就集成度而言，在单个管芯内集成的晶体管近 500 万个。就制造工艺水准上来讲，其集成电路内电极引线的线径接近于 $0.25\mu\text{m}$ ，集成电路制造产业将这一工艺水平称为深亚微米工艺水平。

集成电路制造业的技术进步表现在集成电路的集成度、电路的性能和电路的可靠性不断提高，不断采用新的控制技术使生产成本降低，从而导致了产品的价格不断下降，使集成电路的应用领域也不断扩大。

设计与开发技术手段革新的主要表现是全面地采用了计算机辅助设计（CAD, Computer Aided Design）技术。集成电路的生产发展到今天的 VLSI 阶段，其电路设计的复杂性、制造工艺的高精度控制要求以及器件特性的高指标要求，使在该技术领域从事研发的技术人员不可能只依靠常规的传统经验和简单的递推估算来进行研究、设计和开发工作。而计算机辅助设计手段则成为他们广泛使用和不可缺少的工具。

通常，LSI 的设计和制造过程包括：电路设计、逻辑设计、器件设计、工艺设计、版图

设计、掩膜制造、管芯制造、封装工序、成品测试等阶段。

美国原 AVANT! 公司（现 Synopsys 公司）推出了 Taurus WorkBench (TWB) 超大规模集成电路 TCAD（实现 IC 及 SoC 一体化设计流程中底层仿真软件的总称）一体化仿真与优化平台软件。TWB 又被称为虚拟集成电路加工系统。该系统实现了 TCAD 软件的集成化和仿真过程的可视化。

所谓的集成电路 TCAD 设计技术又被称为当代的集成电路可制造性设计技术，是在完成芯片系统级设计（或称为前端设计）并实现布局布线级设计（或称为后端设计）之后进行的工艺级及器件物理特性级的可制造性设计。本书主要内容为集成电路可制造性设计技术。

本章小结

1. 摩尔定律

摩尔定律（Moore Law）并不是科学界或自然界的自然定律，它仅仅是对半导体业及半导体制程领域的技术规律所进行的技术性归纳和总结。摩尔定律描述了由不断改进的半导体制造工艺技术所带来的指数级增长的独特趋势和特有规律。当然，摩尔定律对集成电路设计和制造产业在一定程度上也起着重要的技术导向和技术驱动作用。所以，仅凭摩尔定律高度地提炼出集成电路产业发展的内在规律这一点，就足够伟大了。重要的是，它在客观上确实起到了推动集成电路产业发展的作用。

2. 电子技术的更新换代

通过绪论内容的学习，我们应当总结出电子技术漫长的发展历程所内含的技术驱动因素。显然，主要的技术驱动因素是电子器件由电子管、晶体管到集成电路而发展起来的。电子器件的发展，历经近百年，历次变革都引发了电子技术和信息技术的革命。

3. 集成电路的规模界定

集成电路按其规模大小可分为：小规模集成电路（SSI, Small Scale Integrate）、大规模集成电路（LSI, Large Scale Integrate）、超大规模集成电路（VLSI, Very Large Scale Integrate）、特大规模集成电路（ULSI, Ultra Large Scale Integrate）。

习 题

1. 简述电子技术的发展历史和电子器件所经历的 4 个发展阶段。
2. 集成电路的系统规模通常使用“集成度”来描述。请解释“集成度”这一概念的含义。

第1章 半导体材料及制备

1.1 半导体材料及半导体材料的特性

硅是自然界中蕴含最丰富的元素之一，约占地壳重量的 25%，它的丰富程度仅次于氧。硅是电子工业中最重要的半导体材料。在自然界中，硅以硅土和硅酸盐的形态出现，它是元素周期表中被研究得最多的元素之一。自然界中的固态物质，可分为晶体和非晶体两大类。晶体和非晶体在内部结构、物理性质和化学性质上都存在着明显差别。

目前，集成电路和各种半导体器件制造中所用的材料主要是硅、锗和砷化镓等单晶，其中，硅单晶体最多。硅器件占世界上出售的半导体器件的 98%以上。本书主要论述的是硅晶体材料及以硅晶体或硅的衍生物为主体结构而制成的器件和集成电路。

正是由于现代半导体器件和集成电路技术的发展，硅已成为人类迄今为止研究最深入、了解最清楚的物质。可以说，现在人类能获取的纯度最高的材料是硅，人类能够制取的直径最大的单晶也是硅。

固态物质以晶体或非晶体两种形式存在。晶体内部的原子均按一定周期排列，任一晶体都可以看成是由原子在三维空间中按一定的规则周期性排列而构成的。内部所有原子按统一周期排列的晶体叫做单晶体，由许多小晶粒无规则地堆积而成的叫做多晶体。生产大规模集成电路所用的硅材料（硅圆晶片）就是单晶体。

硅单晶作为最重要的集成电路衬底材料是制作复杂微电子器件的基础。因此，硅单晶的晶体质量和单晶硅的加工技术水平对集成电路的性能和芯片的合格率有直接影响。为了适应单芯片集成技术发展的需要，人们对硅单晶材料的要求越来越高，对硅单晶材料性质的认识和研究也在深入。单晶生长和衬底晶圆片的加工技术也在不断改进和提高。

本章在简要阐述半导体硅材料的基本特征属性基础上，讨论了集成电路制造各技术层次对半导体材料质量的要求，并将其在晶体管和集成电路的设计与制造方面的应用联系起来。特别重要的是，半导体材料的各向异性特征与若干集成电路制造技术有密切的关系。本章还就半导体晶体的质量特征（特别是晶体的结晶质量）、半导体材料的提纯和硅单晶衬底材料加工技术进行了必要的讨论。

半导体单晶材料的若干属性，对半导体器件或集成电路的制造是至关重要的。例如，半导体材料的熔点和晶体所能承受的温度直接与加工工艺的温度及晶体管或集成电路的工作温度有关；硅的氧化衍生物二氧化硅具有俘获若干种杂质元素的作用，因为这一点而产生出硅的选择性刻蚀工艺和选择性掺杂工艺；半导体单晶体材料的各向异性特征在选择性腐蚀、晶体的各向异性生长、定向解理等方面具有重要应用。