



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材·电子科学与技术专业

现代集成电路

制造技术原理与实践

李惠军 编著 吉利久 夏春秋 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息与电气学科规划教材·电子科学与技术专业

现代集成电路制造技术 原理与实践

李惠军 编著

吉利久 夏春秋 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制造的基础工艺,重点介绍基本原理,并就当前集成电路芯片制造技术的最新发展做了较为详尽的阐述。本书共 18 章,主要内容包括:硅材料及衬底制备、外延生长工艺原理、氧化介质薄膜生长、半导体的高温掺杂、离子注入低温掺杂、薄膜气相淀积工艺、图形光刻工艺原理、掩模制备工艺原理、集成电路工艺仿真、集成结构测试图形、电路管芯键合封装、集成电路性能测试、工艺过程理化分析、管芯失效及可靠性、超大规模集成工艺、芯片产业质量管理、可制造性设计工具和可制造性设计理念等。

受美国新思科技(Synopsys Inc.)授权,本书在国内首次发布新一代纳米级 TCAD 系列仿真工具:Sentaurus TCAD 设计工具的相关技术内容细节。本书免费提供习题答案,立体化教程同步出版。

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高年级本科生和研究生教材,也可供集成电路芯片制造企业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

现代集成电路制造技术原理与实践 / 李惠军编著. —北京:电子工业出版社, 2009.5

(电子信息与电气学科规划教材·电子科学与技术专业)

ISBN 978-7-121-07753-1

I. 现… II. 李… III. 集成电路工艺—高等学校—教材 IV. TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 069101 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳 特约编辑:曹剑锋

印 刷: 北京京师印务有限公司

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 印张:28.25 字数:723.2 千字

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:49.00 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。

序 言

我与李惠军教授的工作友情始于 20 世纪 90 年代初, 已有约 15 个年头了。在我的硕士研究生和博士研究生中, 有相当的数量本科阶段师从于他, 后由他推荐给我。自我们相识时, 我就了解到他在微电子技术领域的教学与科研上已崭露头角, 并从集成电路制造技术的教学与科研基础上转移到集成电路制造工艺及半导体器件物理特性的计算机仿真和分析领域, 且科研成果不断、教学成绩斐然。一路走来, 李惠军教授迎来了他的收获季节, 也已培养出诸多研究生, 著书立说, 颇有成就。受李惠军教授之托, 为他的这部著作写序。我欣然提笔, 不胜感慨。

纵观这部《现代集成电路制造技术原理与实践》——完全可以称为巨著的教科书, 经典教学内容的组织、现代教学内容的吸收, 以及不少超前的新一代 TCAD 技术知识的介绍, 在书中浑然一体, 一气呵成。本书所涉及的内容都是当代大学微电子技术或集成电路制造、封装及设计等相关专业所迫切需要学习的。

这本《现代集成电路制造技术原理与实践》被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。我了解到, 李惠军教授在该教材建设的同时, 组织起一个研发团队, 历经 3 年, 推出了《现代集成电路制造技术原理与实践》交互式、多媒体、立体化教程, 填补了国内微电子技术资源领域的又一空白(在此之前, 李惠军教授已创新性地推出数部微电子技术资源)。可见他源于教学、精于教学、孜孜不倦、笔耕不辍, 其精神是难能可贵的。

在提及李惠军教授似园丁般地耕耘在微电子教学园地时, 我不能不为之而感叹! 李惠军教授曾于 2001 年身患重病, 手术及术后化疗的若干年来, 他以健康的心态和惊人的毅力与病魔斗争。他竟然没有请过一天假、误过一堂课, 在与疾病斗争的过程中, 教学与科研成果仍然层出不穷。壮哉, 好一位兢兢业业的园丁!“天若有情天亦老, 人间正道是沧桑。”我钦佩我们的李惠军教授。

正如李惠军教授在本书前言中所讲到的那样, 当代集成电路的设计大体上分为顶层设计和底层设计两大部分。所谓底层设计, 被称为 TCAD 设计层次, 又被称为集成电路制造级设计。包括布局布线、互连设计及工艺级仿真和器件物理特性级的模拟、验证, 是基于集成电路制造工艺技术总体知识范畴之上的。这本书所覆盖的知识领域正是为集成电路制造工艺制造级设计所服务的。

本书在第 9 章(集成电路工艺仿真)中, 基础性地铺垫了翔实的集成电路制造工艺级仿真的初级知识, 与第 17 章(可制造性设计工具)和第 18 章(可制造性设计理念)的内容相呼应, 涵盖了当代最新的(第五代)集成电路制造级设计工具及其应用的教学内容, 组织得恰到好处。据我所了解, 如此基于集成电路制造技术的系统推介集成电路制造级仿真知识的讲授, 详尽地介绍当代顶级的 TCAD 技术, 在国内微电子技术教科书中尚为首次。毫无疑问, 这对于我国高校微电子技术类教学及第五代 TCAD 制造级设计工具在我国 IC 底层设计领域的深度应用是有建设性作用的。

我相信，这本著作（还有与之相关的《现代集成电路制造技术原理与实践》交互式、多媒体、立体化教程的出版）的面世，将会极大地丰富我国高校微电子技术教学领域的教学资源，为我国微电子科学技术的发展和腾飞，特别是集成电路制造级设计 TCAD 学科的技术进步起到积极的推动作用。

亢宝位
于北京工业大学

前 言

其实,许多要讲的话,讲授本书教学内容之前想要告诉读者的话,都已经迫不及待地揉到本书的绪论里了。

为什么要编撰《现代集成电路制造技术原理与实践》这部教材呢?我认为,本书所涉及的内容都是大学微电子技术和集成电路设计等相关专业的在校生所必须掌握的。

我不否认,在微电子业界内有这样的观点:如今已进入了集成工艺过程的高度自动化控制阶段、工艺级设计的高度计算机化阶段、集成电路的设计已与工艺无关的阶段。一句话,从事微电子领域研究的技术人员甚至于不需要了解集成电路制造工艺过程的基本原理和细节。这种观点对吗?我可以负责任地说,此观点有误!借此机会,予以澄清。其一,再高度自动化的控制,也是由人来掌握的,不能够知其然而不知其所以然;其二,实现集成电路制造工艺的计算机仿真,并最终完成工艺级的模拟、验证、设计和工艺条件的优化实验,都是建立在工艺过程的建模基础之上的,工艺模拟精度的调试则必须首先把握住工艺过程的细节,否则,工艺级的设计和优化则无从谈起。所有这些都告诉我们,集成电路制造工艺原理是从事集成电路底层设计和微电子领域生产、研究的技术人员所必须掌握的知识。

当代集成电路的设计大体上分为顶层设计和底层设计两部分。所谓顶层设计,泛指系统级的描述、仿真、综合与验证环节。所谓底层设计,又被称为 TCAD 设计层次。大体上包括布局布线、版图设计与优化、互连设计及寄生参数的提取、工艺级仿真及器件物理特性级的模拟和验证。可见,特别是集成电路的底层设计知识,是微电子和集成电路设计相关专业的学生所必备的知识。而底层设计知识与集成电路工艺制程关系密切。

作者从事集成电路制造工艺原理的教学及该领域的研究近 30 年。本书为集成电路设计与集成系统专业的教学需求,又兼顾该专业新教学计划知识结构拓宽的要求量身定做。本书集本人的教学实践及科学研究成果为一体,在笔者使用多年的自编讲义的基础上充实内容,又博采众长,编撰而成的教科书。本书具有知识起点浅显、内容覆盖宽泛、知识点讲授较深的多重特征,故使用本书可依读者类型的不同各取所需地选修。讲授本书以 54~72 学时(3 至 5 学分)为宜。

在本书将要出版之际,我要特别感谢北京大学吉利久教授和张兴教授、清华大学杨之廉教授、东南大学王志功教授、北京工业大学吴武臣教授和董利民教授、北京理工大学仲顺安教授对笔者的一贯支持!我更加难以忘怀的是山东大学信息学院袁东风教授、王洪君教授及孙传森教授等诸位学院领导对我教学和科研工作的支持与关心!还要特别感谢多年来济南半导体元件实验所、济南镓锗微电子公司和山东科芯微电子公司的真诚协作!在笔者教学、科研和本书编写过程中,孟堯微电子研发中心的研发团队和我的研究生们给予了我极大的帮助,特别是研究生于英霞和刘岩同学在第五代 TCAD 可制造性工具的应用研究及消化吸收等方面进行了大量开拓性的工作,在此一并致谢。本书编写过程中,得到了美国新思科技 Synopsys Inc.北京办事处总经理秦明先生、资深客户总监刘卫东先生及 Synopsys Inc. 中国 TCAD 技术总监夏春秋先生的鼎力支持。本书第 17 章和第 18 章的内容涵盖了当代最新(第五代)的集

成电路制造级设计工具及其应用的内容。这些内容在中国大陆地区首次被系统地介绍，由山东大学孟堯微电子研发中心的 TCAD 研发团队在消化吸收、验证性应用及工程应用的基础上精心组织、编撰而成，表达准确、深入浅出、文笔流畅又具有很强的可操作性。所有这些，对于我国高等学校集成电路制造级设计知识的教学及第五代 TCAD 制造级设计工具在我国 IC 底层设计界的深度应用，迅速推进我国集成电路的设计（特别是底层制造级设计）与制造水平，是一件非常有意义的事情。

本书的前 16 章由北京大学吉利久教授主审，第 17、18 章由 Synopsys Inc. 中国 TCAD 技术总监夏春秋先生主审。他们为此付出了大量的时间和精力，并提出了诸多修改意见，笔者不胜感激！

我的学生张培伟作为《现代集成电路制造技术原理与实践》多媒体、交互式、立体化教程的系统核心开发者，他的系统开发能力由该立体化教程程序体的技术含量即可见一斑，他对笔者教学资源开发的帮助是巨大的。我的学生马凤勇精心完成了本书全部教学插图的计算机绘图任务，他绘制的各类教学用图精致到令人叹为观止，读者可参见本书图 1-14、图 1-15 和图 1-21，这些精美的教学用图的确为本书增色不小。借此机会，向这两位同学致以深深的谢意！

最后，我深深地感谢本书的责任编辑电子工业出版社的王羽佳女士和为此书的出版付出辛勤劳动的所有出版社工作人员。所有这些，是本书得以顺利出版的保障。

为使本课程的教学达到更好的效果，《现代集成电路制造技术原理与实践》多媒体、交互式、立体化教程已由电子工业出版社同步出版，请登录山东大学孟堯微电子研发中心网站 <http://www.sdmy.sdu.edu.cn> 了解相关细节，联系电话：13964052331。

限于作者的水平及成书的时间关系，书中不妥和谬误之处在所难免，诚望读者批评指正。

李惠军
于山东大学

目 录

绪论	(1)
本章小结	(9)
习题	(10)
第 1 章 硅材料及衬底制备	(11)
1.1 半导体材料的特征与属性	(11)
1.2 半导体材料硅的结构特征	(12)
1.3 半导体单晶制备过程中的晶体缺陷	(13)
1.4 集成电路技术的发展和硅材料的关系	(17)
1.5 关于半导体硅材料及硅衬底晶片的制备	(20)
1.6 半导体硅材料的提纯技术	(21)
1.6.1 精馏提纯四氯化硅技术及其提纯装置	(22)
1.6.2 精馏提纯四氯化硅的基本原理	(23)
1.7 直拉法生长硅单晶	(24)
1.7.1 晶体生成技术的发展现状	(25)
1.7.2 晶体生长技术的分类	(25)
1.7.3 硅直拉单晶生长技术	(25)
1.7.4 硅直拉单晶设备	(27)
1.7.5 硅直拉单晶工艺步骤	(28)
1.8 硅单晶的各向异性特征在管芯制造中的应用	(30)
本章小结	(31)
习题	(32)
本章参考文献	(32)
第 2 章 外延生长工艺原理	(34)
2.1 关于外延生长技术	(34)
2.2 外延生长工艺方法概论	(40)
2.2.1 典型的水平反应器硅气相外延生长系统简介	(40)
2.2.2 硅化学气相淀积外延生长反应过程的一般描述	(41)
2.3 常规硅气相外延生长过程的动力学原理	(44)
2.4 常规硅气相外延生长过程的结晶学原理	(47)
2.5 关于气相外延生长的工艺环境和工艺条件	(49)
2.5.1 外延生长过程中的掺杂	(49)
2.5.2 外延生长速率与反应温度的关系	(50)
2.5.3 外延生长层内的杂质分布	(52)
2.5.4 外延生长缺陷	(53)

2.5.5	外延生长之前的氯化氢气相抛光	(55)
2.5.6	典型的外延生长工艺流程	(56)
2.5.7	工业化外延工序的质量控制	(56)
2.6	发生在硅气相外延生长过程中的二级效应	(57)
2.6.1	外延生长过程中晶片衬底杂质的再分布效应	(57)
2.6.2	外延生长过程中掺入杂质的再分布	(58)
	本章小结	(59)
	习题	(60)
	本章参考文献	(61)
第3章	氧化介质薄膜生长	(63)
3.1	氧化硅介质膜的基本结构	(63)
3.2	二氧化硅介质膜的主要性质	(65)
3.3	氧化硅介质膜影响杂质迁移行为的内在机理	(66)
3.4	氧化硅介质膜的热生长动力学原理	(69)
3.5	典型热生长氧化介质膜的常规生长模式	(72)
	本章小结	(73)
	习题	(75)
	本章参考文献	(75)
第4章	半导体的高温掺杂	(77)
4.1	固体中的热扩散现象及扩散方程	(78)
4.2	常规高温热扩散的数学描述	(82)
4.2.1	恒定表面源扩散问题的数学分析	(82)
4.2.2	有限表面源扩散问题的数学分析	(83)
4.3	常规热扩散工艺简介	(84)
4.4	实际扩散行为与理论分布的差异	(86)
4.4.1	发生在氧化硅-硅界面处的杂质再分布行为	(86)
4.4.2	发生在氧化过程中的氧化增强扩散行为	(87)
4.5	扩散行为的仿真及影响扩散行为的效应	(89)
4.5.1	杂质热扩散及热迁移工艺模型	(89)
4.5.2	氧化增强扩散模型	(89)
4.5.3	对杂质在可动界面处变化的一维描述	(90)
4.5.4	对杂质在可动界面处变化的二维描述	(90)
4.5.5	对常规扩散行为进行的二维描述	(91)
4.6	深亚微米工艺仿真系统所设置的小尺寸效应模型	(92)
	本章小结	(93)
	习题	(94)
	本章参考文献	(95)
第5章	离子注入低温掺杂	(96)
5.1	离子注入掺杂技术的特点	(96)

5.2 关于离子注入技术的理论描述	(97)
5.3 离子注入损伤	(100)
5.4 离子注入退火	(103)
5.5 离子注入设备	(105)
5.6 离子注入的工艺实现	(108)
本章小结	(110)
习题	(111)
本章参考文献	(111)
第6章 薄膜气相淀积工艺	(112)
6.1 常用的几种化学气相淀积方法	(112)
6.1.1 常压化学气相淀积	(113)
6.1.2 低压化学气相淀积	(114)
6.1.3 等离子体增强化学气相淀积	(116)
6.2 晶圆 CVD 加工需求最多的几种介质薄膜	(118)
6.2.1 二氧化硅介质薄膜	(118)
6.2.2 多晶硅介质	(119)
6.2.3 氮化硅介质薄膜	(120)
6.3 化学气相淀积的安全性	(121)
本章小结	(122)
习题	(124)
本章参考文献	(124)
第7章 图形光刻工艺原理	(125)
7.1 引言	(125)
7.2 关于光致抗蚀剂	(127)
7.3 典型的光刻工艺原理	(131)
本章小结	(135)
习题	(136)
本章参考文献	(137)
第8章 掩模制备工艺原理	(138)
8.1 集成电路掩模版制备简述	(138)
8.2 光刻掩模版设计和制备的基本过程	(138)
8.3 当代计算机辅助掩模制造技术	(140)
本章小结	(147)
习题	(147)
本章参考文献	(148)
第9章 集成电路工艺仿真	(149)
9.1 引言	(149)
9.2 集成电路工艺仿真系统简介	(151)
9.3 集成电路制造平面工艺一维仿真系统 SUPREM-2	(153)

9.3.1	集成电路制造平面工艺一维仿真的建模	(153)
9.3.2	一维集成电路工艺仿真系统及其人机交互模式	(155)
9.3.3	SUPREM-2 工艺模拟精度的调试	(170)
9.3.4	一维集成电路制造工艺仿真系统的应用实例	(171)
9.4	集成电路制造平面工艺二维仿真系统 TSUPREM-4	(176)
9.4.1	概述	(176)
9.4.2	TSUPREM-4 仿真系统剖析	(177)
9.4.3	TSUPREM-4 采用的数值算法	(178)
9.4.4	TSUPREM-4 仿真系统的运行	(179)
9.4.5	TSUPREM-4 仿真系统的人机交互语言	(180)
9.4.6	TSUPREM-4 仿真应用实例	(185)
	本章小结	(201)
	习题	(202)
	本章参考文献	(205)
第 10 章	集成结构测试图形	(206)
10.1	引言	(206)
10.2	微电子测试图形的配置及作用	(207)
10.3	常用的微电子测试结构及其测试原理	(209)
10.4	微电子测试图形在集成电路工艺流片监控中的应用	(214)
	本章小结	(218)
	习题	(219)
	本章参考文献	(219)
第 11 章	电路管芯键合封装	(220)
11.1	集成电路晶圆芯片的减薄及划片技术	(220)
11.2	集成电路晶圆管芯的装片技术	(222)
11.3	集成电路管芯内引线键合工艺	(224)
11.4	集成电路管芯的外封装技术	(227)
	本章小结	(229)
	习题	(229)
	本章参考文献	(230)
第 12 章	集成电路性能测试	(231)
12.1	集成电路测试的种类和应用简介	(231)
12.2	集成电路的电性能测试	(232)
12.3	集成电路的测试方式和测试规范	(233)
12.4	各种测试规范之间的关系	(235)
12.5	集成电路静态参数测试简述	(235)
12.6	集成电路动态参数测试简述	(237)
	本章小结	(238)
	习题	(239)

本章参考文献	(239)
第 13 章 工艺过程理化分析	(240)
13.1 集成电路生产过程中进行理化分析的目的	(240)
13.2 IC 生产中常用的理化分析仪器	(241)
13.2.1 扫描电子显微镜	(241)
13.2.2 电子微探针	(244)
13.2.3 扫描俄歇微探针	(245)
13.2.4 离子探针显微分析仪	(248)
13.2.5 透射电子显微镜的应用	(250)
13.2.6 透射扫描电子显微镜	(252)
本章小结	(252)
习题	(253)
本章参考文献	(253)
第 14 章 管芯失效及可靠性	(254)
14.1 半导体器件的可靠性及其所包括的内容	(254)
14.2 集成电路常见的失效模式及失效机理	(255)
14.3 关于金属化系统的失效	(257)
14.4 高能粒子辐射造成的失效行为	(259)
14.5 辐射效应对硅集成电路性能的影响	(259)
14.6 集成电路性能的可靠性保证	(260)
本章小结	(263)
习题	(264)
本章参考文献	(265)
第 15 章 超大规模集成工艺	(266)
15.1 当代微电子技术的飞速发展与技术进步	(266)
15.2 当代超深亚微米级层次的技术特征	(267)
15.3 超深亚微米层次下的小尺寸效应	(267)
15.4 典型的超深亚微米 CMOS 制造工艺	(269)
15.5 超深亚微米 CMOS 工艺技术模块简介	(272)
本章小结	(281)
习题	(282)
本章参考文献	(282)
第 16 章 芯片产业质量管理	(284)
16.1 引言	(284)
16.2 质量管理理论基础	(284)
16.3 集成电路芯片产业的生产管理模式	(287)
16.4 集成电路芯片产业的技术管理模式	(292)
16.5 集成电路芯片产业的质量管理	(295)
本章小结	(297)

习题	(297)
本章参考文献	(298)
第 17 章 可制造性设计工具	(299)
17.1 新一代集成工艺仿真系统 Sentaurus Process	(300)
17.1.1 Sentaurus Process 工艺级仿真工具简介	(300)
17.1.2 Sentaurus Process 的仿真功能及交互工具	(305)
17.1.3 Sentaurus Process 所收入的近代模型	(309)
17.1.4 Sentaurus Process 工艺仿真实例	(312)
17.1.5 关于 Sentaurus Structure Editor 器件结构生成器	(331)
17.2 新一代器件物理特性级仿真工具 Sentaurus Device	(341)
17.2.1 Sentaurus Device 的基本功能	(341)
17.2.2 Sentaurus Device 的使用	(342)
17.2.3 实现器件物理特性分析的典型流程	(343)
17.2.4 启动 Sentaurus Device	(344)
17.2.5 Sentaurus Device 内嵌的主要器件物理模型	(345)
17.2.6 Sentaurus Device 器件物理特性模拟工程实例	(351)
17.3 新一代集成电路虚拟制造系统 Sentaurus Workbench	(359)
17.3.1 Sentaurus Workbench 概述	(359)
17.3.2 如何在 Sentaurus Workbench 环境下建立仿真项目	(360)
17.3.3 DoE 实验设计向导和表面响应建模	(369)
17.3.4 在 SWB 环境下完成的 90nm NMOSFET 优化实例	(376)
本章小结	(384)
习题	(385)
本章参考文献	(386)
第 18 章 可制造性设计理念	(388)
18.1 纳米级 IC 可制造性设计理念	(389)
18.1.1 DFM 技术的实现流程	(390)
18.1.2 DFM 与工艺可变性、光刻之间的关系	(391)
18.1.3 DFM 工具的发展	(393)
18.2 提高可制造性良品率的 OPC 技术	(393)
18.2.1 光刻技术的现状与发展概况	(394)
18.2.2 关于光学邻近效应	(394)
18.2.3 光学邻近效应校正技术	(395)
18.2.4 用于实现光刻校正的工具软件	(400)
18.3 Synopsys 可制造性设计解决方案	(403)
18.3.1 良品率设计分析工具套装	(404)
18.3.2 掩模综合工具	(405)
18.3.3 掩模数据准备工具 CATS™	(406)
18.3.4 光刻验证及光刻规则检查系统	(406)

18.3.5 虚拟光掩模步进曝光模拟系统	(406)
18.3.6 TCAD 可制造性设计工具	(407)
18.3.7 制造良品率的管理工具	(409)
本章小结	(410)
习题	(411)
本章参考文献	(411)
附录 A 集成电路制造技术专业术语大全	(412)
附录 B 现代集成电路制造技术缩略语	(424)

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，图的右下角是一枚与其电学参数十分接近的大功率晶体管，将二者放在一起，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。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。

1947 年 12 月 23 日，世界上第一只晶体管诞生，主要发明者（见图 0-2）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 0-3 所示为第一只晶体管的实物照片。

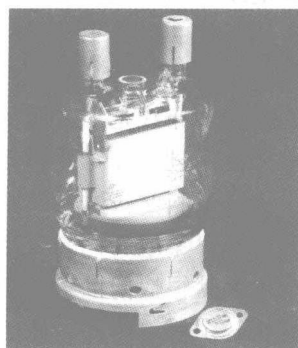


图 0-1 电子管与晶体管

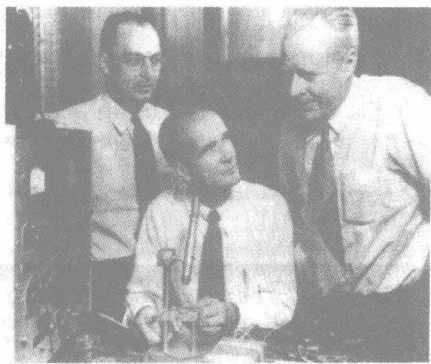


图 0-2 由左至右为巴丁、肖克莱和布拉顿

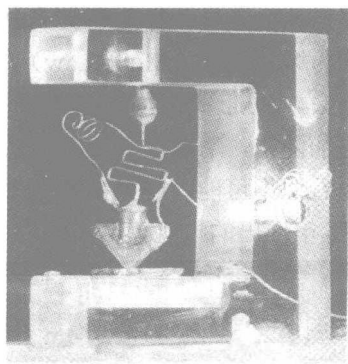


图 0-3 第一只晶体管实物照片

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。他们必须专门为其建造大型机房、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，计算器在奇迹般“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。

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。

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，第一块集成电路就很快问世了。1958年，第一块集成电路问世，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而成为半导体材料中最耀眼的明星。

我们知道，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业绩。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（MooreLaw）的构想——这种增长速度将在未来 10 年左右的时间内继续保持下去，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。40 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 0-4 和图 0-5 分别是 1970 年和 1971 年推出的大规模集成电路管芯照片。

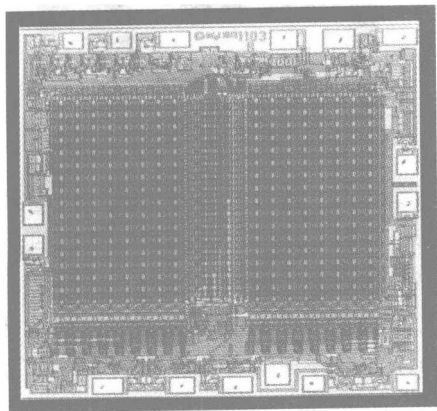


图 0-4 第一块 1103DRAM 芯片（1970）

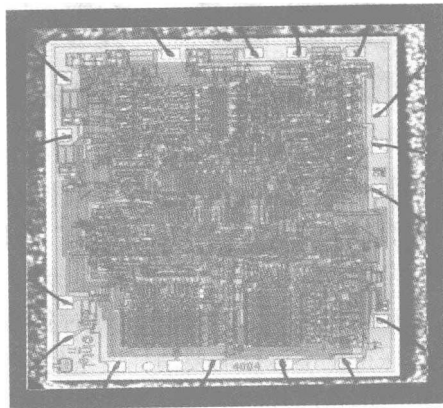


图 0-5 第一块 4004 微处理器（1971）

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。由 $0.18\sim 0.13\mu\text{m}$ 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）。特征尺寸更小的 90nm 工艺线因技术受限而迟迟达不到规模化的量产。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。

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（预计到 2010 年，特征尺寸将达 45nm 以下）。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 年间，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。放眼 2015 年，计算机网络产业将迎来全盛时期，而生物产业将接踵而至，而技术支持将是微电子技术的技术进步。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 40 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期，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持续、