

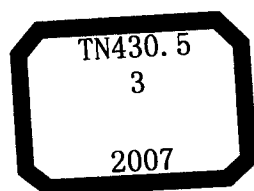
现代集成电路制造

工艺原理

XIANDAI JICHENGDIANLU ZHIZAO
GONGYI YUANLI

□ 李惠军 / 编著

山东大学出版社



现代集成电路制造工艺原理

李惠军 编著

山东大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代集成电路制造工艺原理/李惠军编著. — 济南:
山东大学出版社, 2007. 2
ISBN 978-7-5607-3331 -9

- I. 现...
- II. 李...
- III. 集成电路工艺
- IV. TN405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 016596 号

山东大学出版社出版发行

(山东省济南市山大南路 27 号 邮政编码: 250100)

山东省新华书店经销

莱芜市圣龙印务有限责任公司印刷

787×1092 毫米 1/16 19.25 印张 395 千字

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

印数: 1—2500 册

定价: 30.00 元

版权所有, 盗印必究

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社营销部负责调换

内容简介

本书围绕当代集成电路制造的基础工艺,重点介绍所涉及的基本原理,并就当前集成电路芯片制造技术的最新发展作了较为详尽的阐述。本书可作为普通高校或职业技术学院理、工科本(专)科电子科学技术(一级学科)下微电子学与固体电子学及微电子技术方向、集成电路设计及集成系统或微电子技术专业的专业课教材、微电子相关专业的研究生选修课教材,亦可作为集成电路芯片制造企业工程技术人员参考书。

本书共分为十一章,第一章至第八章以叙述基本工艺原理为主,主要包括: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。第九章收入了当代诸多超大规模集成制造工艺的相关内容,并以当代超大规模集成电路所具有的小尺寸特征为切入点,围绕抑制小尺寸效应的现代工艺技术,介绍了诸多较为成熟的现代工艺技术模块(或称之为工艺组合)。系统地将这些知识点纳入超大规模集成电路制造技术的范畴,对提高现代集成电路制造技术的教学质量有着积极的意义。第十章介绍了集成电路芯片产业的生产管理、技术管理和质量管理等方面的相关知识,力图让读者对集成电路芯片产业的特征有一个整体的概念。第十一章对现代集成电路制造技术术语进行了详解,以此为知识点,加强学生对这门课程的理解。

本书内容丰富,在编写中力求做到文字简练、图文并茂、注重实际,以较好地反映当代集成电路制造技术的现状。书中还包含有作者多年来从事该技术领域的教学和研究所取得的诸多成果。例如:对半导体硅材料和硅外延生长缺陷的研究;硅(111)外延生长原理及晶体的扩展行为及显微形貌等相关研究成果,在国内均为首次发表。

编者的话

目前,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。甚至有人认为,微电子领域的技术人员无需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,工艺级别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集成电路生产、研究的技术人员所必须掌握的。

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、互联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,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。

笔者从事了近三十年集成电路制造工艺原理的教学及研究,本书集教学实践与科学研究成果为一体,在笔者使用多年的自编讲义之基础上充实提高、又博采众长,是根据山东大学信息学院集成电路设计与集成系统专业的知识结构要求量身定做、编撰而成的教科书。学习本书的课堂学时以 48 学时至 64 学时为宜。为达到更好的学习效果,山东大学孟堯微电子研发中心另有《集成电路制造技术》交互式、多媒体教学辅助课件及《现代集成电路制造技术—原理与实践》多媒体、交互式、立体化教程供选购。有意者可与山东大学孟堯微电子研发中心联系:<http://www.sdmy.sdu.edu.cn>。

在本书将要出版之际,我要特别感谢北京大学吉利久教授、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、董利民教授和北京理工大学仲顺安教授对笔者的一贯支持;作者更难以忘怀的是山东大学信息学院袁东风教授(院长)、王洪君教授(教学副院长)及孙传森教授(原教学副院长)等诸位院领导对我教学



及科研工作的支持与关心；作者难忘多年来同济南半导体元件实验所、济南镭姆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、科研和本书成书的过程中，孟尧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，在此一并致谢。如果这本书尚有一点教学与参考的价值，也算是对所有关心和帮助过我的领导、同事、朋友和学生们的回报，这当然是我最大的欣慰。

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。我的学生马风勇精心完成了本书全部教学插图的电脑绘制任务，他绘制的各类教学用图精致到令人叹为观止，读者可参见书中图 1-14、图 1-15 和图 1-23，这些精美的教图的确为本书增色不少。借此机会，向这两位同学致以深深的谢意。

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，不吝赐教。

李惠军
2006 年 12 月 18 日
于山东大学

目 录

绪 论	(1)
第 1 章 硅材料及衬底制备	(13)
§ 1.1 半导体材料的特征与属性	(14)
§ 1.2 半导体材料硅的结构特征	(14)
§ 1.3 半导体单晶制备过程中的晶体缺陷	(15)
§ 1.4 集成电路技术的发展和硅材料的关系	(19)
§ 1.5 关于半导体硅材料及硅衬底晶片的制备	(22)
§ 1.6 半导体硅材料的提纯技术	(24)
1.6.1 精馏提纯四氯化硅技术及其提纯装置	(24)
1.6.2 精馏提纯四氯化硅的基本原理	(25)
§ 1.7 直拉法生长硅单晶	(27)
§ 1.8 硅单晶的各向异性特征在管芯制造中的应用	(33)
小 结	(35)
习题与解答	(36)
参考文献	(38)
第 2 章 外延生长工艺原理	(39)
§ 2.1 关于外延生长技术	(39)
§ 2.2 外延生长工艺方法概论	(46)
2.2.1 典型的水平反应器硅气相外延生长系统简介	(46)
2.2.2 硅化学气相淀积外延生长反应过程的一般描述	(46)
§ 2.3 常规硅气相外延生长过程的动力学原理	(50)
§ 2.4 常规硅气相外延生长过程的结晶学原理	(54)
§ 2.5 关于气相外延生长的工艺环境和工艺条件	(55)
2.5.1 外延生长过程中的掺杂	(55)
2.5.2 外延生长速率与反应温度的关系	(56)



2.5.3	外延生长层内的杂质分布	(58)
2.5.4	外延生长缺陷	(59)
2.5.5	外延生长之前的氯化氢气相抛光	(61)
2.5.6	典型的外延生长工艺流程	(62)
2.5.7	工业化外延工序的质量控制	(63)
§ 2.6	发生在硅气相外延生长过程中的二级效应	(63)
2.6.1	外延生长过程中基片衬底杂质的再分布效应	(63)
2.6.2	外延生长过程中掺入杂质的再分布	(65)
小 结		(65)
习题与解答		(69)
参考文献		(70)
第 3 章	氧化介质薄膜生长	(72)
§ 3.1	氧化硅介质膜的基本结构	(72)
§ 3.2	二氧化硅介质膜的主要性质	(75)
§ 3.3	氧化硅介质膜影响杂质迁移行为的内在机理	(75)
§ 3.4	氧化硅介质膜的热生长动力学原理	(79)
§ 3.5	典型热生长氧化介质膜的常规生长模式	(82)
小 结		(84)
习题与解答		(91)
参考文献		(93)
第 4 章	半导体的高温掺杂	(95)
§ 4.1	固体中的热扩散现象及扩散方程	(97)
§ 4.2	常规高温热扩散的数学描述	(100)
§ 4.3	常规热扩散工艺简介	(103)
§ 4.4	实际扩散行为与理论分布的差异	(105)
§ 4.5	扩散行为的仿真及影响扩散行为的效应	(109)
§ 4.6	深亚微米工艺仿真系统所设置的小尺寸效应模型	(112)
小 结		(113)
习题与解答		(116)
参考文献		(118)
第 5 章	离子注入低温掺杂	(120)
§ 5.1	离子注入掺杂技术的特点	(120)
§ 5.2	关于离子注入技术的理论描述	(122)



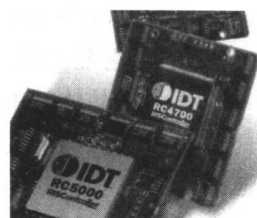
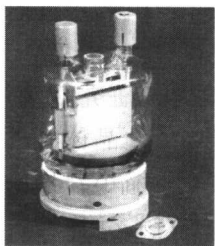
§ 5.3 关于离子注入损伤	(126)
§ 5.4 离子注入退火	(129)
§ 5.5 离子注入设备	(132)
§ 5.6 离子注入的工艺实现	(135)
小 结	(137)
习题与解答	(142)
参考文献	(143)
第 6 章 薄膜气相淀积工艺	(144)
§ 6.1 常用的几种化学气相淀积方法	(145)
6.1.1 常压化学气相淀积(APCVD)	(146)
6.1.2 低压化学气相淀积(LPCVD)	(147)
6.1.3 等离子体增强化学气相淀积(PECVD)	(149)
§ 6.2 晶圆 CVD 加工需求最多的几种介质薄膜	(151)
6.2.1 二氧化硅(SiO_2)介质薄膜	(151)
6.2.2 多晶硅(POS)介质	(152)
6.2.3 氮化硅(Si_3N_4)介质薄膜	(154)
§ 6.3 化学气相淀积(CVD)的安全性	(155)
小 结	(156)
习题与解答	(161)
参考文献	(162)
第 7 章 图形光刻工艺原理	(163)
§ 7.1 关于光致抗蚀剂	(165)
§ 7.2 常规光刻工艺原理	(170)
7.2.1 涂 胶	(171)
7.2.2 前 烘	(171)
7.2.3 曝 光	(172)
7.2.4 显 影	(172)
7.2.5 坚 膜	(172)
7.2.6 腐 蚀	(173)
7.2.7 去 胶	(173)
小 结	(175)
习题与解答	(178)
参考文献	(179)



第 8 章 掩模制备工艺原理	(180)
§ 8.1 集成电路掩模版的制备	(180)
§ 8.2 光刻掩模版设计和制备的基本过程	(181)
8.2.1 原图绘制	(181)
8.2.2 初 缩	(182)
8.2.3 精缩兼分步重复	(182)
§ 8.3 当代计算机辅助掩模制造技术	(183)
8.3.1 原图数据处理系统	(183)
8.3.2 版图修改	(185)
8.3.3 版图验证	(185)
8.3.4 版图尺寸修正	(186)
小 结	(188)
习题与解答	(189)
参考文献	(191)
第 9 章 超大规模集成工艺	(192)
§ 9.1 当代微电子技术的飞速发展与技术进步	(192)
§ 9.2 当代超深亚微米级层次的技术特征	(193)
§ 9.3 超深亚微米(VDSM)层次下的小尺寸效应	(194)
9.3.1 热载流子退化效应	(194)
9.3.2 短沟道效应	(195)
9.3.3 漏、源穿透效应	(195)
9.3.4 载流子速度饱和效应	(196)
§ 9.4 典型的超深亚微米 CMOS 制造工艺	(196)
§ 9.5 超深亚微米 CMOS 工艺技术模块简介	(200)
9.5.1 CMOS 体结构中的隔离工艺模块	(201)
9.5.2 CMOS 体结构中阱结构形成工艺模块	(203)
9.5.3 CMOS 体结构中自对准硅化物形成工艺	(205)
9.5.4 小尺寸 MOS 器件轻掺杂漏技术	(206)
9.5.5 大规模集成电路多层互连技术	(206)
9.5.6 集成电路互连表面的平坦化技术	(209)
小 结	(210)
习题与解答	(212)
参考文献	(213)



第 10 章 芯片产业质量管理	(216)
§ 10.1 质量管理理论基础	(216)
§ 10.2 集成电路芯片产业的生产管理模式	(220)
10.2.1 管理体制的选择	(220)
10.2.2 管理体制的特点	(221)
10.2.3 生产计划的管理	(222)
§ 10.3 集成电路芯片产业的技术管理模式	(225)
§ 10.4 集成电路芯片产业的质量管理	(228)
小 结	(230)
习题与解答	(232)
参考文献	(234)
第 11 章 现代集成电路制造技术术语详解	(235)
附录 1 现代集成电路制造技术缩略语	(279)
附录 2 常用数表	(293)
附表 1 常用物理常数	(293)
附表 2 长度单位转换表	(293)
附表 3 压力单位转换表	(294)
附表 4 能量单位转换表	(294)
附表 5 力单位转换表	(294)
附表 6 净化间气体管道颜色	(294)
附表 7(a) 芯片制造常用材料的性质	(295)
附表 7(b) 芯片制造常用材料的性质	(295)
附表 8 芯片工艺线常用的清洗腐蚀剂	(295)



绪 论

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。由自然界中采集富含硅成分的化合物,经过产业化纯化精馏提纯可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棒。单晶硅棒再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。晶体管、集成电路等半导体器件就是以硅片为载体(通常称为衬底),经过完整而冗长的精密、微细加工而完成的。

自 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。

1947 年 12 月 23 日,世界上第一只晶体管诞生,主要发明者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(见图 0-1)。1956 年,他们因此项重大发明而被授予诺贝尔物理学奖。图 0-2 为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“电子管数字化计算机”。他们必须专门为它建造大型机房、配置

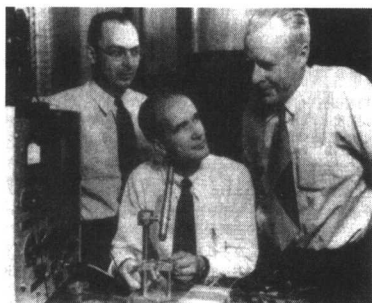


图 0-1 由左至右为巴丁、肖克莱和布拉顿

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。你难以想象,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。晶体管、特别是能够包容数百万只晶体管的集成电路芯片的问世,

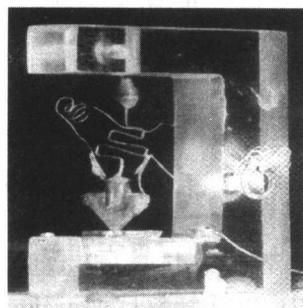


图 0-2 第一只晶体管实物照片

使计算器在奇迹般“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,



远比当时的电子管数字化计算机先进得多的计算机。学生们可以将它们置于课桌上,只需给它配上几节五号电池即可正常工作了。

第一只晶体管的问世,诱发了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。集成电路正在追求高集成度、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 0-3 所描述的是第一只晶体管的发明者肖克莱在讲课的情景,由照片可见,肖克莱先生在向听众讲授半导体中的能带理论。正是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。

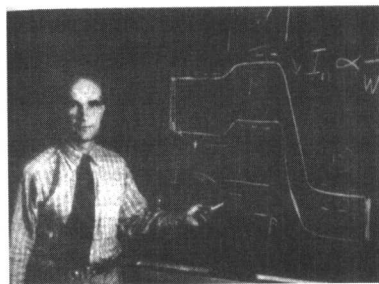


图 0-3 肖克莱在讲述半导体能带结构

随着科学技术的不断发展,人们对电子装置小型化、轻量化有了进一步的要求。将分立器件“集成”化的问题又摆在了科学家们面前。随着半导体

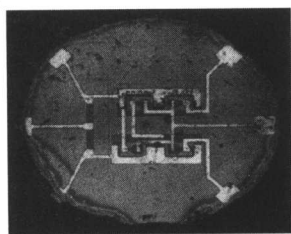


图 0-4 第一枚集成电路

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、家用电器上相继使用了集成电路。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。图 0-4 是世界上第一枚集成电路的实物照片。

我们知道,Pentium-IV 微处理器比 Pentium-III 微处理器有着更高的工作速度。Pentium-III 微处理器集成有 2800 万只晶体管,而 Pentium-IV 微处理器则集成了 4200 万只晶体管。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(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翻一倍的成绩。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,他提出了被人们称之为摩尔定律(Moore-law)的构想——这种增长速度将在未来 10 年之内保持这个速度。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 0-5 和图 0-6 分别是 1970 年和 1971 年推出的大规模集成电路管芯照片。

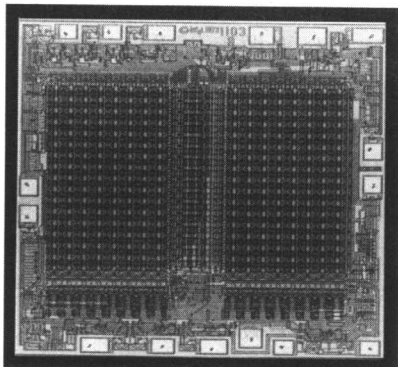


图 0-5 1103DRAM 芯片(1970)

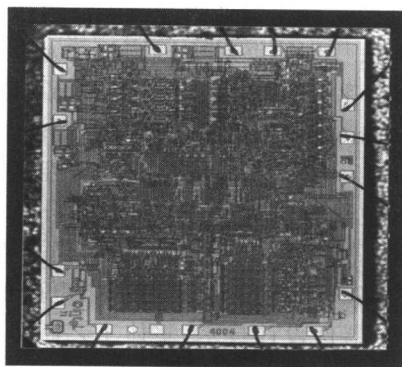


图 0-6 4004 微处理器(1971)

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《电子学》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,以此抽象转化为对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

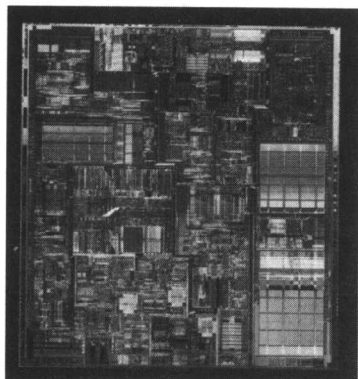


图 0-7 Pentium-4 微处理器芯片

来阐述以上所说明的思想。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 $0.18\mu\text{m}\sim 0.13\mu\text{m}$ 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。

图 0-7 中的 Pentium-4 微处理器芯片是 Intel 公司推出的一款微处理芯片。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。

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”。实施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 2007 年,特征尺寸将达 65nm)。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,而这一切离不开微电子技术的进步。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 年中得到了迅速的增长,这一增长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,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世纪,是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪,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领域的新世纪。而微电子技术领域的技术核心乃是微电子晶圆、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。图 0-8 中的蚂蚁与芯片生动地说明了宏观与微观的巨大反差。

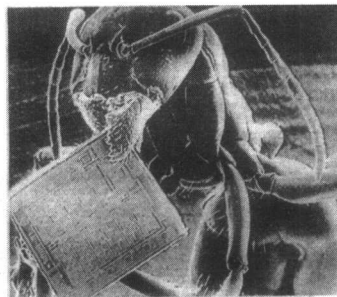


图 0-8 宏观与微观—蚂蚁与芯片

1. 关于半导体及半导体工业

电子技术的发展是因电子器件的发展而发展起来的。电子器件的发展历经近百年,经过了四个发展阶段(图 0-9)。

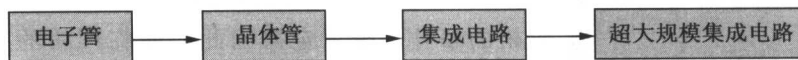


图 0-9 电子技术发展的四个阶段



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,简述一下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,逐步发现了半导体材料;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,运用量子学说建立了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。



图 0-10 ENIAC 计算机

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(图 0-10)。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。有关 ENIAC 的数据如下:使用电子管约 17000 只;电子元件约 14 万只;使用机电继电器约 1500 只;运行功率约 150kW(接近一台现代电动机车的牵引功率);总重量约 30t(由 23 个巨型控制柜和部分外部设备组成);计算速度为:每秒钟完成 83 次加法运算;内存为 80 个字节(640bit);整个计算机系统占地约 180m²。1947年12月,肖克莱和巴登等人发明半导体锗点接触三极管;1948年,提出半导体的 P-N 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;1956年:肖克莱因在半导体领域的系列成就获诺贝尔奖;1956年,肖克莱半导体实验室成立;1957年,美国仙童半导体公司成立(由肖克莱半导体实验室解体而成,Intel 公司总裁葛洛夫即为仙童半导体公司的创始人之一);1958年,超高频硅微波晶体管问世;1959年,有人提出气相制备单晶硅晶层的设想并获成功;1959年,有人提出硅与锗等主要半导体材料的氧化物特性数据;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)。

1960年12月,世界上第一块硅集成电路制造成功(仅集成了十几只晶体管和五个电阻,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 公司推出世界上第一颗微处理器 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 0-11 为 Intel 公司总部一角。



图 0-11 Intel 公司一角

1972年,Intel 公司推出世界上第一块半导体存储器 1103(这是一块记忆容量为



1000位[bit]的DRAM-动态随机存取存储器芯片);1972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位元的80386微处理器;1989年2月,第一枚80486微处理器在Intel公司出炉。

以下是回忆第一枚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,干得天黑地,2月17日,第一颗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,推出第一颗Pentium75微处理器($0.8\mu\text{m}$ 工艺);1994年,推出第一颗Pentium-II微处理器($0.6\mu\text{m}$ 工艺);1995年11月,Pentium-PRO微处理器($0.35\mu\text{m}$ 工艺)问世(见图0-12)。

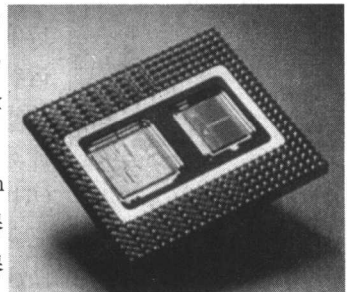


图0-12 Pentium-PRO微处理器

2. 关于半导体工业向微电子产业的演变

集成电路的出现,一定程度上预示着半导体工业走向产业化和走向成熟;预示着半导体技术向微电子技术方向上的演变开始了。集成电路的设计与制造技术的发展使世人刮目相看,著名的摩尔定律就成功地预测了集成电路的集成度将以每一年半翻一翻的增长率变化,其表征功能的综合指标也会相应地提高一倍。当今,已经进入电子仪器发展的第四代,即大规模集成电路和超大规模集成电路的发展阶段。我们使用一个被称之为“集成度”的概念来表征集成电路制造的水平及其变化。“集成度”这个概念,可以反映出微电子集成电路产业集成电路芯片的设计与制造技术的水平。它表示以单个管芯为单位所包含(或称为集成)的晶体管个数。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1000万只晶体管/单位管芯。较为严格地讲,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(当代的水平为 $0.18\mu\text{m}$,或称之为超深亚微米);硅圆片直径(现已达12英寸,约300mm)。图0-13所示为超大规模集成电路晶圆加工中的薄膜溅射工序。



图0-13 芯片加工中的溅射工序

半导体工业为什么有如此高的发展速度呢?主要