

- 中国高等职业技术教育研究会推荐
- 高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

微电子制造工艺技术

主编 肖国玲
主审 劳文薇



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

□ 中国高等职业技术教育研究会推荐

高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

微电子制造工艺技术

主 编 肖国玲

副主编 黄从贵

主 审 劳文薇

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书是一本综合介绍微电子制造工艺的教材，是按照高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材的要求编写而成的。

本书以硅器件平面工艺为主线，适当兼顾其他工艺方法。内容侧重于微电子制造工艺技术的介绍，为方便半导体业界以外人士阅读，还介绍了一些半导体理论知识以及半导体工业方面的内容，使读者可以在较短时间内对微电子制造工艺有较为完整的认识，同时深入了解微电子技术的特点，掌握微电子制造工艺技术。每章后附有复习思考题，便于读者自测、自查。针对微电子技术更新速度极快的特点，书后附录中给出了常用集成电路相关网址，便于读者及时查阅新技术与新工艺。本书参考教学时数为48学时。

本书针对高职高专院校微电子类专业学生的特点，坚持实用为主，够用为度，详细介绍微电子制造工艺，重点突出应用能力培养。本书结构清晰，语言通俗易懂，适用于教学、培训和自学。

★本书配有电子教案，需要者可登录出版社网站，免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

微电子制造工艺技术 / 肖国玲, 主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.9

中国高等职业技术教育研究会推荐 高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2103-6

I. 微... II. ①肖... ②黄... III. 微电子技术—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 117652 号

策 划 张 媛

责任编辑 曹 旻 张 媛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2008年9月第1版 2008年9月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 13

字 数 301千字

印 数 1~4000册

定 价 18.00元

ISBN 978-7-5606-2103-6/TN·0453

XDUP 2395001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜，谨防盗版。

序

进入 21 世纪以来,高等职业教育呈现出快速发展的形势。高等职业教育的发展,丰富了高等教育的体系结构,突出了高等职业教育的类型特色,顺应了人民群众接受高等教育的强烈需求,为现代化建设培养了大量高素质技能型专门人才,对高等教育大众化作出了重要贡献。目前,高等职业教育在我国社会主义现代化建设事业中发挥着越来越重要的作用。

教育部 2006 年下发了《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》,其中提出了深化教育教学改革,重视内涵建设,促进“工学结合”人才培养模式改革,推进整体办学水平提升,形成结构合理、功能完善、质量优良、特色鲜明的高等职业教育体系的任务要求。

根据新的发展要求,高等职业院校积极与行业企业合作开发课程,根据技术领域和就业岗位群任职要求,参照相关职业资格标准,改革课程体系和教学内容,建立突出职业能力培养的课程标准,规范课程教学的基本要求,提高课程教学质量,不断更新教学内容,而实施具有工学结合特色的教材建设是推进高等职业教育改革发展的重要任务。

为配合教育部实施质量工程,解决当前高职高专精品教材不足的问题,西安电子科技大学出版社与中国高等职业技术教育研究会在前三轮联合策划、组织编写“计算机、通信电子、机电及汽车类专业”系列高职高专教材共 160 余种的基础上,又联合策划、组织编写了新一轮“计算机、通信、电子类”专业系列高职高专教材共 120 余种。这些教材的选题是在全国范围内近 30 所高职高专院校中,对教学计划和课程设置进行充分调研的基础上策划产生的。教材的编写采取在教育部精品专业或示范性专业的高职高专院校中公开招标的形式,以吸收尽可能多的优秀作者参与投标和编写。在此基础上,召开系列教材专家编委会,评审教材编写大纲,并对中标大纲提出修改、完善意见,确定主编、主审人选。该系列教材以满足职业岗位要求为目标,以培养学生的应用技能为着力点,在教材的编写中结合任务驱动、项目导向的教学方式,力求在新颖性、实用性、可读性三个方面有所突破,体现高职高专教材的特点。已出版的第一轮教材共 36 种,2001 年全部出齐,从使用情况看,比较适合高等职业院校的需要,普遍受到各学校的欢迎,一再重印,其中《互联网实用技术与网页制作》在短短两年多的时间里先后重印 6 次,并获教育部 2002 年普通高校优秀教材奖。第二轮教材共 60 余种,在 2004 年已全部出齐,有的教材出版一年多的时间里就重印 4 次,反映了市场对优秀专业教材的需求。前两轮教材中有十几种入选国家“十一五”规划教材。第三轮教材 2007 年 8 月之前全部出齐。本轮教材预计 2008 年全部出齐,相信也会成为系列精品教材。

教材建设是高职高专院校教学基本建设的一项重要工作。多年来,高职高专院校十分重视教材建设,组织教师参加教材编写,为高职高专教材从无到有,从有到优、到特而辛勤工作。但高职高专教材的建设起步时间不长,还需要与行业企业合作,通过共同努力,出版一大批符合培养高素质技能型专门人才要求的特色教材。

我们殷切希望广大从事高职高专教育的教师,面向市场,服务需求,为形成具有中国特色和高职教育特点的高职高专教材体系作出积极的贡献。

中国高等职业技术教育研究会会长

2007 年 6 月



高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

编审专家委员会名单

主任: 温希东 (深圳职业技术学院副校长 教授)

副主任: 马晓明 (深圳职业技术学院通信工程系主任 教授)

余 华 (武汉船舶职业技术学院电子电气工程系主任 副教授)

电子组 组长: 余 华(兼) (成员按姓氏笔画排列)

于宝明 (南京信息职业技术学院电子信息工程系副主任 副研究员)

马建如 (常州信息职业技术学院电子信息工程系副主任 副教授)

刘 科 (苏州职业大学信息工程系 副教授)

刘守义 (深圳职业技术学院 教授)

许秀林 (南通职业大学电子系副主任 副教授)

高恭娴 (南京信息职业技术学院电子信息工程系 副教授)

余红娟 (金华职业技术学院电子系主任 副教授)

宋 焯 (长沙航空职业技术学院 副教授)

李思政 (淮安信息职业技术学院电子工程系主任 讲师)

苏家健 (上海第二工业大学电子电气工程学院 教授)

张宗平 (深圳信息职业技术学院电子通信技术系 高级工程师)

陈传军 (金陵科技学院电子系主任 副教授)

姚建永 (武汉职业技术学院电信学院院长 副教授)

徐丽萍 (南京工业职业技术学院电气与自动化系 高级工程师)

涂用军 (广东科学技术职业学院机电学院副院长 副教授)

郭再泉 (无锡职业技术学院自动控制与电子工程系主任 副教授)

曹光跃 (安徽电子信息职业技术学院电子工程系主任 副教授)

梁长垠 (深圳职业技术学院电子工程系 副教授)

通信组 组长: 马晓明(兼) (成员按姓氏笔画排列)

王巧明 (广东邮电职业技术学院通信工程系主任 副教授)

江 力 (安徽电子信息职业技术学院信息工程系主任 副教授)

余 华 (南京信息职业技术学院通信工程系 副教授)

吴 永 (广东科学技术职业学院电子系 高级工程师)

张立中 (常州信息职业技术学院 高级工程师)

李立高 (长沙通信职业技术学院 副教授)

林植平 (南京工业职业技术学院电气与自动化系 高级工程师)

杨 俊 (武汉职业技术学院通信工程系主任 副教授)

俞兴明 (苏州职业大学电子信息工程系 副教授)

项目策划 马乐惠

策 划 张 媛 薛 媛 张晓燕

前 言

信息产业是国民经济的先导产业，微电子技术是信息产业的核心。微电子技术的迅猛发展，使人类进入了高度信息化时代。满足现代电子信息技术飞速发展要求的基础与核心乃是集成电路(IC)。目前，集成电路产业正向高集成度、细线宽和大直径晶圆片等方向发展。

随着微电子制造工艺技术的不断发展，集成电路特征尺寸越来越小，速度越来越快，电路规模越来越大，功能越来越强，衬底尺寸越来越大，形成了集成电路小型化、高速、低成本、高可靠性、高效率的特点。

本书针对高职高专院校微电子类专业学生的特点，坚持实用为主，够用为度，详细介绍微电子制造工艺，重点突出应用能力培养。把集成电路的制造工艺原理和制造技术融为一体，在编写过程中突出半导体工艺制作流程，在讲授经典工艺原理基础上，尽力吸收当前先进的制造技术。

全书共 10 章，主要内容如下：

第 1 章介绍微电子技术的发展过程，微电子技术扩展的新领域，微电子技术的发展趋势以及半导体工业的构成。

第 2 章介绍半导体材料基础知识，包括集成电路主要基础材料硅单晶的晶体结构知识、物理性质，影响器件性能、成品率的原始晶体缺陷。

第 3 章介绍集成电路制造工艺流程。

第 4 章介绍晶体生长方法和晶圆制备工艺流程，以及集成电路硅衬底成型技术、硅衬底研磨和清洗技术、硅衬底片抛光技术。

第 5 章简要介绍集成电路的电路设计、版图设计、工艺设计以及集成电路设计的四项基础工艺，即薄膜制备、光刻、掺杂和热处理。

第 6 章集中介绍 IC 制备中的氧化及钝化技术、外延技术和淀积方法，包括二氧化硅的结构、性质及制备，以及硅气相外延设备、生长动力、基本化学反应、自掺杂效应及控制、外延层缺陷及控制、CVD 外延工艺优化、外延层的测试设备与方法等。

第 7 章主要介绍 IC 制备中的光刻技术与制版原理，包括光刻的作用、地位和方法以及光刻机性能及光刻版制备知识。

第 8 章重点介绍 IC 制备中掺杂杂质扩散，包括扩散原理与模型、离子注入技术及原理、常用元素的扩散工艺技术原理、扩散参数的测量。

第 9 章介绍封装的功能和形式、微电子封装工艺流程和微电子封装技术的发展。

第 10 章介绍半导体工业环境和材料洁净度要求，以及污染控制对于半导体工业的重要性。

本书由两位作者合作完成，无锡职业技术学院黄从贵老师编写了其中的第 2、3、10 章，并绘制了全书大部分用图，其余各章由无锡职业技术学院肖国玲老师编写完成。肖国玲老

师负责全书的统稿工作。在编写过程中，无锡职业技术学院电子信息技术系潘健、王波等老师给予了很大的支持和帮助，在此一并向他们表示衷心的感谢！

由于微电子技术的发展非常迅速，加上编者的水平有限，书中定有不足之处，殷切希望广大读者批评指正。

编 者
2008年3月

目 录

第 1 章 半导体工业概述	1
1.1 引言	1
1.1.1 半导体技术的发展	1
1.1.2 集成电路产品发展趋势	2
1.2 半导体工业的构成	4
1.3 半导体器件的生产阶段	4
复习思考题	5
第 2 章 半导体材料基础知识	7
2.1 晶体学基础知识	7
2.1.1 晶体与非晶体	7
2.1.2 原子间的键合	7
2.1.3 空间点阵	11
2.1.4 晶向和晶面的表示方法	13
2.2 常用的半导体材料和工艺化学品	17
2.2.1 本征半导体和掺杂半导体	17
2.2.2 常用的半导体材料	20
2.2.3 工艺化学品	21
复习思考题	23
第 3 章 集成电路有源元件和工艺流程	24
3.1 概述	24
3.1.1 半导体元器件的生成	24
3.1.2 集成电路的形成	26
3.2 集成电路制造工艺	27
3.2.1 双极型硅晶体管工艺	27
3.2.2 TTL 集成电路工艺流程	28
3.2.3 MOS 器件工艺流程	32
3.2.4 Bi-CMOS 工艺	36
复习思考题	30
第 4 章 晶体生长和晶圆制备	40
4.1 晶体和晶圆质量	40
4.1.1 对衬底材料的要求	40

4.1.2 晶体的缺陷	41
4.2 晶体生长	47
4.2.1 晶体生长的概念	47
4.2.2 晶体生长的方法	47
4.3 晶圆制备	57
4.3.1 晶圆制备工艺流程	57
4.3.2 其他处理	61
复习思考题	62
第 5 章 集成电路制造工艺概述	63
5.1 集成电路设计简介	63
5.1.1 概述	63
5.1.2 工艺设计	64
5.1.3 版图设计	66
5.2 集成电路的四项基础工艺概述	69
5.2.1 薄膜制备	69
5.2.2 光刻	70
5.2.3 掺杂	73
5.2.4 热处理	74
复习思考题	74
第 6 章 薄膜制备	75
6.1 外延	75
6.1.1 外延的机理和作用	76
6.1.2 外延方法	77
6.2 氧化	89
6.2.1 氧化层的用途	89
6.2.2 氧化的机理和特点	90
6.2.3 氧化的方法	91
6.2.4 热氧化设备简介	93
6.2.5 影响氧化率的因素	95
6.3 多晶硅和介质膜淀积	96
6.3.1 薄膜的化学气相淀积	98
6.3.2 多晶硅	103
6.4 金属淀积	106
6.4.1 金属膜的用途	106
6.4.2 金属淀积方法	107
6.5 金属化和平坦化	111
6.5.1 金属化	112
6.5.2 平坦化	114
复习思考题	118

第 7 章 光刻	120
7.1 图形加工技术简介	120
7.2 基本光刻工艺流程	120
7.2.1 光刻胶	121
7.2.2 光刻工艺流程	125
7.2.3 光刻的工艺要求	136
7.3 光刻机和光刻版	137
7.3.1 光刻机	137
7.3.2 光刻版	139
复习思考题	150
第 8 章 掺杂	151
8.1 合金法	151
8.2 热扩散法	152
8.2.1 扩散的条件	152
8.2.2 典型的扩散形式	153
8.2.3 扩散工艺步骤	153
8.2.4 扩散层质量参数	154
8.2.5 扩散条件的选择	157
8.3 离子注入法	159
8.3.1 离子注入法的特点	159
8.3.2 离子注入设备	160
8.3.3 晶体损伤和退火	161
8.4 金扩散	162
复习思考题	163
第 9 章 封装	164
9.1 封装的功能和形式	164
9.1.1 封装的功能	164
9.1.2 封装的形式	165
9.2 微电子封装工艺流程	166
9.3 我国微电子封装技术的现状	172
复习思考题	172
第 10 章 污染控制	173
10.1 污染控制的重要性	173
10.1.1 主要污染物	173
10.1.2 污染物引起的问题	174
10.2 主要污染源及其控制方法	174
10.2.1 空气	175
10.2.2 厂务设备	176
10.2.3 洁净室工作人员	177

10.2.4	工艺用水	178
10.2.5	工艺化学品	178
10.2.6	工艺化学气体	178
10.2.7	其他污染源	178
10.3	晶片表面清洗	179
10.4	烘干技术	179
10.5	整体工艺良品率	179
10.5.1	累积晶圆生产良品率	180
10.5.2	晶圆电测良品率	182
10.5.3	封装良品率	182
	复习思考题	183
附录 A	洁净室等级标准	184
附录 B	微电子行业常用网址	186
附录 C	常用专业词汇表	188
	参考文献	198

第 1 章 半导体工业概述

整个电子工业可分为半导体工业和系统(电子产品)两个主要部分。广义的半导体工业包括原材料生产供应、电路设计、芯片制造和半导体工业设备制造及化学品供应;系统部分包括基于半导体器件的各类电子产品的设计和生 产, 比如消费类电子产品, 甚至太空飞船。通常我们理解的半导体工业主要指狭义的概念, 即电路设计和芯片制造。

1.1 引 言

1.1.1 半导体技术的发展

电信号处理工业始于 Lee Deforest 在 1906 年发现的真空三极管。真空三极管有两个重要的功能: 开关和放大。开关是指电子器件可接通和切断电流(“开”或“关”); 放大则是指电子器件可把接收到的信号放大, 并保持信号原有特征的功能。1947 年世界上第一台计算机 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer)就是主要用真空管制造出来的。ENIAC 的制造用了 19 000 个真空管和数千个电阻及电容器。这台电子计算机和现代的计算 机大相径庭, 它花费了当时的 400 000 美元, 占据约 1500 平方英尺的面积, 重量达 30 吨, 工作时产生大量的热量, 需要一个小型发电站来供电。

真空管有一系列的缺点, 如体积庞大, 元器件老化很快, 要求相对较多的电能维持运行, 连接处易于变松导致真空泄漏, 易碎等。ENIAC 和其他基于真空管的电子设备的主要缺点是由于真空管易烧毁而导致运行时间有限, 这种情形一直持续到 20 世纪 40 年代。

1947 年 12 月 23 日, 贝尔实验室的三位科学家巴丁(John Bardeen)、布莱顿(Walter Brattin)和肖克莱(William Shockley)演示了用半导体材料锗制成的电子放大器件, 这种器件不但有真空管的功能, 而且为固态无真空, 体积小、重量轻、耗电低且寿命长。这种器件最初被命名为“传输电阻器”, 而后更名为晶体管(Transistor), 这三位科学家也因他们的这一发明而被授予 1956 年的诺贝尔物理学奖。

第一个晶体管和今天的高密度集成电路相去甚远, 但它标志着固态电子时代的诞生。除晶体管之外, 固态技术还用于制造二极管、电阻器和电容器。

现在, 我们把这些每个芯片中只含有一个器件的电子器件称为分立器件。大多数分立器件在功能和制造上比集成电路的要求少。20 世纪 50 年代, 早期半导体工业进入了一个非常活跃的时期, 大量生产供晶体管收音机和晶体管计算机使用的器件。虽然分立器件

不被认为是尖端产品，然而它们却用于最精密复杂的电子系统中。1998年，它们的销售额仍占全部半导体器件销售额的12%。

1959年，分立器件的统治地位走到了尽头。当年，在德州仪器(TI)公司工作的青年工程师 Jack Kilby 第一次成功地在—块锗半导体基材上，用几个晶体管、二极管、电容器和利用锗芯片天然电阻的电阻器组成了一个完整的电路。这一发明就是影响深远的集成电路(Integrated Circuit)。

Kilby 开发的电路并不是现今所普遍应用的形式，早些时候在 Fairchild Camera 公司的 Jean Horni 开发出一种在芯片表面上形成电子结来制作晶体管的平面制作工艺，使用铝蒸气镀膜并使之形成适当的形状来做器件的连线，这种技术称为平面技术(Planar Technology)。Fairchild Camera 公司的 Robert Noyce 应用这种技术把预先在硅表面上形成的器件连接起来。Kilby 和 Noyce 开发的集成电路成为以后所有集成电路的模式，Kilby 和 Noyce 也共同享有集成电路的专利。

现在所说的集成电路是指由多个元器件(如晶体管、电阻器、电容器等)及其连线按一定的电路形式制作在一块或几块半导体基片上，并具有一定功能的一个完整电路。它具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性高等一系列优点。

集成电路中器件的尺寸和数量是集成电路发展的两个共同标志。器件的尺寸是以设计中的最小尺寸来表示的，通常以微米($1\ \mu\text{m}=10^{-6}\ \text{m}$)为单位，称做特征图形尺寸。电路中器件的数量也就是电路的密度，用集成度水平表示，其范围从小规模集成(SSI)到超大规模集成(ULSI)，有些地方称其为百万芯片(Megachips)。

从1947年开始，半导体工业的工艺水平持续发展。工艺的提高导致了集成电路具有更高的集成度和可靠性，从而进一步推动了电子工业的革命。工艺进步使半导体工业可以以更小的尺寸来制造器件和电路，电路性能更佳，密度更高，数量更多，可靠性更高。半导体工业在整体上一一直在全世界范围内持续增长，即使到了今天，虽然已显示出成熟迹象，但其增长速度依然高于其他成熟行业，说明它仍有很大的发展潜力。英特尔公司的创始人之一 Gordon Moore 在1964年预言集成电路的密度会每18个月翻一番，这个预言就是著名的摩尔定律。

近几十年来，在固体物理、微电子器件工艺和电子学三者的基础上发展起来—门新的学科——微电子学科。它发展迅速，主要归功于微电子器件工艺(也就是常说的半导体器件工艺)的迅速发展。大规模集成电路和超大规模集成电路的诞生和发展，是微电子器件工艺发展的里程碑。

1.1.2 集成电路产品发展趋势

半导体技术的兴起，是从1947年出现第一个晶体管开始的；1960年发明了平面工艺及外延技术，为半导体集成电路的发展奠定了基础；1961~1962年，出现了各类中、小规模半导体数字逻辑集成电路；1963~1964年，出现了小规模线性集成电路；1967年，大规模集成电路出现；1978年，超大规模集成电路出现。在短短二三十年的时间内，经历了晶体管、集成电路、大规模集成电路、超大规模集成电路时代，目前已开始向巨大规模集成电路发展。今天，集成电路(IC)技术及其应用已经涉及到工业部门和人类生活的各个领域，以IC技术为基础，以计算机为核心的信息技术，正在推动着新的世界性工业革命高潮的来临。

集成电路产品的发展趋势主要体现在如下几个方面:

(1) 特征图形尺寸减小, 芯片和晶圆尺寸增大。近几十年, 集成电路的发展趋势是体积越来越小, 速度越来越快, 电路规模越来越大, 功能越来越强, 衬底硅片尺寸越来越大。这正是大规模和超大规模集成电路的小型化、高速、低成本和高可靠性、高效率生产等特点所带来的结果。提高速度和减小体积、提高集成度是统一的, 而且前者必须通过后者来实现, 体积小了速度就快。微电子学对无限小空间的追求也就是对速度的追求, MOS 集成电路的关键尺寸是“源”和“漏”之间的距离, 双极型集成电路的关键尺寸是基极厚度。这些尺寸越小, 载流子渡越时间越短, 集成电路的开关速度也就越快。

工艺的进展不仅把线宽压缩到尽可能小的尺寸, 还要使单位面积所含元器件数目更多, 而且把集成块的面积扩大到尽可能大的程度, 因而超微和超大同时出现, 综合体现了集成电路工业的现在和未来。无论是电子计算机, 还是电视、雷达等, 它们的工作原理和作用早已为大家所认识, 但正是因为出现了大规模和超大规模集成电路, 才有可能将包含数亿只晶体管的电子计算机塞进巡航导弹的小小弹头里; 计算机由数百平方米之大减小到不足半平方米, 且可将这种过去需占满整幢大楼的电子设备安置在飞船上; 将微小跟踪雷达装到小型喷气式战斗机上; 将小型自导雷达安装到火箭、导弹上; 甚至将雷达信管装进炮弹弹头, 以便随时测定目标距离和在临近目标时自动爆炸。这些都是过去不能想象的事情。

由于光刻和多层连线技术的极大提高, 使单个元件特征图形尺寸减小, 电路密度增加, 电路速度大大提高, 芯片或电路耗电量大大降低, 集成度从 SSI 发展至 ULSI(百万芯片)。在圆形的晶圆上制造方形或长方形的芯片导致在晶圆的边缘处剩余一些不可使用的区域, 当芯片的尺寸增大时, 这些不可使用的区域也随之增大。为了弥补这种损失, 半导体业界采用更大尺寸的晶圆。

(2) 低成本, 高可靠性。超大规模集成电路制造成本和价格比小规模集成电路大幅度下降是显而易见的。不管超大规模集成电路内部线路结构多么复杂, 它们所包含的元器件数目如何庞大, 一旦完成制版, 制造一块超大规模集成电路芯片, 其所需的成本几乎与制造一块小规模集成电路芯片相差无几。

超大规模集成电路的生产特点是设计、研制费用较高, 这实际上是将一部分整机设计所需要的费用转移到元器件上去了, 但一经投产, 成本就开始下降, 且随着生产批量的加大成本可进一步降低。价格的降低又促进应用的普及, 应用的普及又向电路的生产单位提出更大的需求量。可以说, 没有电子设备的大规模集成化, 就不会呈现电子技术应用的大普及。今天电子设备的价格已反映出集成电路的研制和生产水平, 特别是超大规模集成电路的水平。现在每个家庭平均拥有的集成电路芯片在 200 块以上, 而且还在不断增长, 这在大规模集成电路发展起来之前是不可能达到的。

发展到超大规模集成电路后, 一块电路就是一个系统, 甚至就是一个功能齐全完整电子系统, 其内部包含的大量元器件都已被彼此极其紧密地集成在一块小芯片上, 避免了由于外部焊接和相互连接的损坏而引起的故障, 以及由于元器件与元器件、电路与电路之间装配不密、互连线过长而受到的外来干扰及大量功耗, 从而更保证了系统工作的可靠性。

晶体管和中、小规模集成电路的工作可靠性虽分别比电子管提高 10 倍和 100~1000 倍, 而由大规模集成电路组装的系统, 其可靠性要比具有相同功能的中、小规模集成电路组成的系统又高 100 倍以上。

(3) 缺陷密度减小, 内部连线水平提高。虽然从晶体管发明至今, 微电子技术的历史只有短短 60 多年, 但发展之迅猛, 常常令人感到迷惑: 晶体管特征尺寸的极限是多少, 50 nm, 27 nm, 还是更小尺寸; 对于这个问题, 如同原子物理中的“基本粒子”一样, 发现“基本粒子”以后, 又发现更小的“粒子”。光学光刻时代的极限问题也早已提出, 可是光学光刻技术仍然在发展, 人们还会利用几十年间形成的成熟的硅微电子技术去开拓新的领域, 发展新型微电子技术。世界集成电路的生产水平在 2004 年左右进入 0.1 μm , 2011 年有望达到 0.05 μm 。整个微电子领域的前沿热点从制造技术、器件物理、工艺物理到材料技术等方面全部进入了 100 nm 以下的纳米领域。

随着特征图形尺寸的减小, 以及在元件表面上使用多层绝缘层和导电层相叠加的多层连线工艺, 在制造中, 减小缺陷密度和缺陷尺寸的要求变得十分关键, 污染控制变得更加重要, 半导体厂家在污染控制上的花费将会更大。

综上所述, 集成电路的这几方面特点正迎合了科学技术发展的迫切需要。集成电路的迅猛发展将为越来越多的技术领域提供日益优质的服务, 从而不断为人类做出重大贡献。

1.2 半导体工业的构成

半导体工业被称为现代工业的“吐金机”。1998 年, 美国出版了《美国半导体工业是美国经济的倍增器》一书, 该书称: “半导体是一种使其他所有工业黯然失色, 又使其他工业得以繁荣发展的技术”。书中介绍, 美国半导体工业 1996 年创造了 410 亿美元的财富, 并以每年 15.7% 的速度增加, 比美国整个经济增长速度快 13 倍以上。可以毫不夸张地说, 半导体工业是现代工业的生命线。

半导体技术作为推动信息时代前进的原动力, 是现代高科技的核心与先导。世界发达国家和地区的经济起飞都是从大力发展半导体产业开始的, 其中最具有代表性的是美、日、韩和台湾地区。

半导体工业包括材料供应商、电路设计、芯片制造和半导体工业设备及化学品供应商, 这是广义的概念。我们又往往把制造半导体固态器件和电路的企业生产过程称为晶圆制造(Wafer Fabrication), 认为它是半导体工业的主要组成部分。在这个行业中有三种类型的芯片供应商: 第一种是集设计、制造、封装和销售为一体的公司; 第二种是做设计和晶圆市场的公司, 它们从晶圆厂购买芯片; 第三种是晶圆代工厂家, 它们为顾客生产各种类型的芯片。

半导体产业中以产品为终端市场的生产商和为内部使用的生产商都生产芯片。以产品为终端市场的生产商制造并在市场上销售芯片, 以产品为内部使用的生产商生产的芯片用于它们自己的终端产品, 如计算机、通信产品等, 其中一些企业也向市场销售芯片, 还有一些企业生产专业的芯片供内部使用, 在市场上购买其他的芯片产品。

1.3 半导体器件的生产阶段

固态器件的制造有四个不同的阶段, 分别是原材料准备、晶体生长和晶圆准备、晶圆制造以及封装(见图 1-1)。



图 1-1 半导体制造阶段

在原材料准备阶段，将开采的半导体材料根据半导体标准进行提纯。例如硅材料是以沙子为原料，沙子通过转化可成为具有多晶硅结构的纯净硅。

第二个阶段，经过提纯的材料首先形成带有特殊的电子和结构参数的晶体，再进行晶体生长。接下来的晶体生长和晶圆准备工艺中，将晶体切割成薄片，称为“晶圆”(Wafer)，并进行表面处理。半导体工业除了用硅单晶，也用锗和不同半导体材料的混合物来制作器件与集成电路。

第三个阶段是晶圆制造，也就是在晶圆表面形成器件或集成电路。每个晶圆上通常可形成 200~300 个同样的器件，有时也可多至几千个。在晶圆上由分立器件或集成电路占据的区域叫做芯片。晶圆制造也可称为制造、Fab、芯片制造或是微芯片制造。晶圆的制造有几千个步骤，它们可分为两个主要部分：第一，在晶圆表面上形成晶体管和其他器件，称为前线工艺(FEOL)；第二，以金属线把器件连在一起并加一层最终保护层，称为后线工艺(BEOL)。晶圆上的芯片完成后，仍然保持晶圆形式，接下来，每个芯片经过晶圆电测来检测是否符合客户的要求。经过电测检验合格的芯片送入封装阶段。

封装阶段是通过一系列的过程把晶圆上的芯片分割开，然后把它们封装起来。封装起到保护芯片免于污染和外来伤害的作用，并提供坚固耐用的电气引脚以和电路板或电子产品相连。

我们可以把整个微电子制造基本工艺归纳为以切、磨、抛为主体的衬底制备，以外延、氧化、蒸发、淀积为主体的薄膜制备，以光刻、制版为主体的图形加工和以扩散、离子注入等为主体的掺杂技术等方面的内容。

复习思考题

- 1-1 简述电子器件的发展过程。
- 1-2 真空管与晶体管有何区别？
- 1-3 什么是分立器件？什么是集成电路？
- 1-4 什么是集成度水平？按照集成度水平，集成电路的发展趋势是怎样的？
- 1-5 什么叫特征图形尺寸？
- 1-6 试描述混合电路和集成电路的区别。
- 1-7 半导体工业由哪几部分构成？各部分主要包括哪些内容？
- 1-8 描述半导体器件生产的主要阶段。
- 1-9 用哪些技术指标来描述集成电路工艺技术水平？
- 1-10 集成电路是哪一年由谁发明的？
- 1-11 为什么说实现社会信息化的网络及其关键部件不管是各种计算机和/或通讯机，它们的基础都是微电子？
- 1-12 采用哪些途径来提高半导体器件的集成度？

1-13 简单描述一下你认为 21 世纪微电子芯片将沿着那些方向继续向前发展。

1-14 对如下英文缩写给出简要解释:

(1) IC; (2) SSI; (3) MSI; (4) LSI; (5) VLSI; (6) ULSI; (7) GSI。

1-15 硅集成电路制造工艺主要由哪几个工序组成?

1-16 从微电子学科技术中里程碑式的发明事件出发,谈谈你对微电子科学研究发展及创新的认识和体会。