

21 世纪 高 职 高 专 规 划 教 材

微 电 子 技 术 系 列



# 集成电路设计 VHDL 教程

史小波 程梦璋 许会芳 编著

清华大学出版社

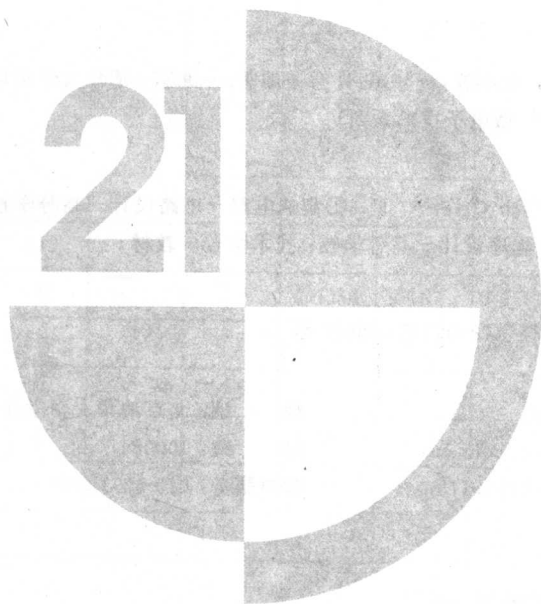


21 世纪 高 职 高 专 规 划 教 材

微 电 子 技 术 系 列

# 集成电路设计 VHDL 教程

史小波 程梦璋 许会芳 编著



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书根据职业技术教育的特点,从实用角度出发,围绕“了解设计方法、掌握一种语言、熟悉一种工具”的要求,介绍了 VHDL 的语法规则、程序结构及设计方法,集成电路 EDA 技术的基本概念和方法,FPGA/CPLD 器件的基本结构和原理以及常用开发工具 MAX+plus II 的使用方法。本书力求通俗易懂,突出实用性和可操作性,略去了部分抽象冷僻的内容,重点放在基本概念和常用方法的讲解,每部分内容均由大量实例导入,并针对使用中易出现的问题进行重点讲解。

本书可作为高职高专微电子及电子信息类专业的教学用书,也可作为有关技术人员学习 VHDL 及集成电路 EDA 技术的参考教材。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

集成电路设计 VHDL 教程/史小波,程梦璋,许会芳编著. —北京:清华大学出版社,2005.6

(21 世纪高职高专规划教材. 微电子技术系列)

ISBN 7-302-10855-2

I. 集… II. ①史… ②程… ③许… III. ①集成电路—电路设计—高等学校:技术学校—教材

②硬件描述语言,VHDL—程序设计—高等学校:技术学校—教材

IV. ①TN402 ②TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 036605 号

出 版 者:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

客户服务:010-62776969

责任编辑:刘 青

印 刷 者:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市春园印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:14.25 字数:292 千字

版 次:2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-10855-2/TN·246

印 数:1~4000

定 价:18.00 元

# 出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,担负着为国家培养并输送生产、建设、管理、服务第一线高素质技术应用型人才的重任。

进入 21 世纪后,高职高专教育的改革和发展呈现出前所未有的发展势头,学生规模已占我国高等教育的半壁江山,成为我国高等教育的一支重要的生力军;办学理念上,“以就业为导向”成为高等职业教育改革与发展的主旋律。近两年来,教育部召开了三次产学研交流会,并启动四个专业的“国家技能型紧缺人才培养项目”,同时成立了 35 所示范性软件职业技术学院,进行两年制教学改革试点。这些举措都表明国家正在推动高职高专教育进行深层次的重大改革,向培养生产、服务第一线真正需要的应用型人才的方向发展。

为了顺应当前我国高职高专教育的发展形势,配合高职高专院校的教学改革和教材建设,进一步提高我国高职高专教育教材质量,在教育部的指导下,清华大学出版社组织出版“21 世纪高职高专规划教材”。

为推动规划教材的建设,清华大学出版社组织并成立“高职高专教育教材编审委员会”,旨在对清华版的全国性高职高专教材及教材选题进行评审,并向清华大学出版社推荐各院校办学特色鲜明、内容质量优秀的教材选题。教材选题由个人或各院校推荐,经编审委员会认真评审,最后由清华大学出版社出版。编审委员会的成员皆来源于教改成效大、办学特色鲜明、师资实力强的高职高专院校、普通高校以及著名企业,教材的编写者和审定者都是从事高职高专教育第一线的骨干教师和专家。

编审委员会根据教育部最新文件政策,规划教材体系,比如部分专业的两年制教材;“以就业为导向”,以“专业技能体系”为主,突出人才培养的实践性、应用性的原则,重新组织系列课程的教材结构,整合课程体系;按照教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”,教材的基础理论以“必要、够用”为度,突出基础理论的应用和实践技能的培养。

本套规划教材的编写原则如下:

- (1) 根据岗位群设置教材系列,并成立系列教材编审委员会;
- (2) 由编审委员会规划教材、评审教材;
- (3) 重点课程进行立体化建设,突出案例式教学体系,加强实训教材的出版,完善教学服务体系;
- (4) 教材编写者由具有丰富教学经验和多年实践经历的教师共同组成,建立“双师

型”编者体系。

本套规划教材涵盖了公共基础课、计算机、电子信息、机械、经济管理以及服务等大类的主要课程,包括专业基础课和专业主干课。目前已经规划的教材系列名称如下:

#### • 公共基础课

公共基础课系列

#### • 计算机类

计算机基础教育系列

计算机专业基础系列

计算机应用系列

网络专业系列

软件专业系列

电子商务专业系列

#### • 电子信息类

电子信息基础系列

微电子技术系列

通信技术系列

电气、自动化、应用电子技术系列

#### • 机械类

机械基础系列

机械设计与制造专业系列

数控技术系列

模具设计与制造系列

#### • 经济管理类

经济管理基础系列

市场营销系列

财务会计系列

企业管理系列

物流管理系列

财政金融系列

#### • 服务类

旅游系列

艺术设计系列

本套规划教材的系列名称根据学科基础和岗位群方向设置,为各高职高专院校提供“自助餐”形式的教材。各院校在选择课程需要的教材时,专业课程可以根据岗位群选择系列;专业基础课程可以根据学科方向选择各类的基础课系列。例如,数控技术方向的专业课程可以在“数控技术系列”选择;数控技术专业需要的基础课程,属于计算机类课程可以在“计算机基础教育系列”和“计算机应用系列”选择,属于机械类课程可以在“机械基础系列”选择,属于电子信息类课程可以在“电子信息基础系列”选择。依此类推。

为方便教师授课和学生学习,清华大学出版社正在建设本套教材的教学服务体系。本套教材先期选择重点课程和专业主干课程,进行立体化教材建设:加强多媒体教学课件或电子教案、素材库、学习盘、学习指导书等形式的制作和出版,开发网络课程。学校在选用教材时,可通过邮件或电话与我们联系获取相关服务,并通过与各院校的密切交流,使其日臻完善。

高职高专教育正处于新一轮改革时期,从专业设置、课程体系建设到教材编写,依然是新课题。希望各高职高专院校在教学实践中积极提出意见和建议,并向我们推荐优秀选题。反馈意见请发送到 E-mail:gzgz@tup.tsinghua.edu.cn。清华大学出版社将对已出版的教材不断地修订、完善,提高教材质量,完善教材服务体系,为我国的高职高专教育出版优秀的高质量的教材。

高职高专教育教材编审委员会

# 前言

## 集成电路设计 VHDL 教程

随着电子技术的发展,尤其是超大规模集成电路的发展,集成电路的设计变得越来越复杂。我国集成电路产业起步较晚,集成电路设计人员极其缺乏。近年来,国家已将集成电路产业作为信息产业的重中之重,同时国外集成电路产业向国内转移的趋势也日渐明显,面对这种形势,集成电路设计人才的培养显得十分紧迫。另一方面,随着 EDA 技术的发展与成熟,高职高专类学生经过适当的学习和培训完全可以进入电子设计行业。

EDA 技术是当代电子技术人员必须掌握的方法,本书针对高职高专类学生的特点,比较系统地介绍了 VHDL 的语法规则、程序结构及设计方法,集成电路 EDA 技术的基本概念和方法,FPGA/CPLD 器件的基本结构和原理以及常用开发工具 MAX+plus II 的使用方法。每部分均配有丰富的实例。

本课程要求的前置课程主要有计算机应用基础、数字电子技术等,在教学中应围绕“了解基本方法、掌握一种语言、熟悉一种工具”的要求来进行。其中 VHDL 语言是难点,根据职业教育的特点,可以打破计算机语言的传统教学模式,不必花费大量的时间学习语法,而应该突出实验环节,通过实际的电路设计来掌握有关内容。

本书第 2 章、第 3 章、第 4 章由史小波编写;第 1 章、第 5 章由程梦璋编写;第 6 章由许会芳编写。

由于编写时间仓促,加之作者水平有限,书中难免有错漏之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

2005 年 3 月

# 目 录

## 集成电路设计 VHDL 教程

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 概述            | 1  |
| 1.1 集成电路概况          | 1  |
| 1.1.1 集成电路发展简史      | 2  |
| 1.1.2 集成电路的分类       | 5  |
| 1.2 集成电路 EDA 技术     | 8  |
| 1.3 硬件描述语言及数字系统的设计  | 12 |
| 1.3.1 传统的数字系统设计方法   | 12 |
| 1.3.2 利用硬件描述语言的设计方法 | 13 |
| 1.4 可编程逻辑器件的结构与原理   | 15 |
| 1.4.1 PLD 的分类       | 15 |
| 1.4.2 PLD 的结构和原理    | 17 |
| 习题                  | 22 |
| 第 2 章 VHDL 的结构与要素   | 23 |
| 2.1 实体              | 25 |
| 2.1.1 实体语句结构        | 25 |
| 2.1.2 类属说明语句        | 26 |
| 2.1.3 端口说明语句        | 28 |
| 2.2 结构体             | 29 |
| 2.3 库               | 30 |
| 2.3.1 库的用法          | 30 |
| 2.3.2 库的种类          | 30 |
| 2.4 程序包             | 31 |
| 2.5 配置              | 33 |

|              |                         |           |
|--------------|-------------------------|-----------|
| 2.6          | VHDL 的文字规则 .....        | 36        |
| 2.6.1        | 数字型文字 .....             | 36        |
| 2.6.2        | 字符和字符串型文字 .....         | 37        |
| 2.6.3        | 数位串型文字 .....            | 37        |
| 2.6.4        | 标识符 .....               | 37        |
| 2.6.5        | 下标名和段名 .....            | 38        |
| 2.7          | VHDL 的数据类型 .....        | 39        |
| 2.7.1        | 数据对象 .....              | 39        |
| 2.7.2        | VHDL 的预定义数据类型 .....     | 39        |
| 2.7.3        | IEEE 预定义标准逻辑位和矢量 .....  | 41        |
| 2.7.4        | 自定义数据类型的方法 .....        | 42        |
| 2.7.5        | 数据类型的转换 .....           | 43        |
| 2.8          | VHDL 的操作符 .....         | 45        |
| 2.8.1        | 逻辑操作符 .....             | 45        |
| 2.8.2        | 关系操作符 .....             | 46        |
| 2.8.3        | 算术操作符 .....             | 47        |
| 2.8.4        | 符号操作符 .....             | 49        |
|              | 习题 .....                | 50        |
| <b>第 3 章</b> | <b>VHDL 的基本语句 .....</b> | <b>52</b> |
| 3.1          | 顺序语句 .....              | 52        |
| 3.1.1        | 赋值语句 .....              | 52        |
| 3.1.2        | 流程控制语句 .....            | 56        |
| 3.1.3        | WAIT 语句 .....           | 65        |
| 3.1.4        | 返回语句 .....              | 66        |
| 3.1.5        | 空操作语句 .....             | 66        |
| 3.2          | 并行语句 .....              | 66        |
| 3.2.1        | 块语句 .....               | 67        |
| 3.2.2        | 进程语句 .....              | 68        |
| 3.2.3        | 并行信号代入语句 .....          | 71        |
| 3.2.4        | 条件信号赋值语句 .....          | 71        |
| 3.2.5        | 选择信号赋值语句 .....          | 72        |
| 3.2.6        | 元件例化语句 .....            | 73        |
| 3.2.7        | 生成语句 .....              | 75        |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 3.3 其他语句                   | 76         |
| 3.3.1 ASSERT 语句和 REPORT 语句 | 76         |
| 3.3.2 属性描述与定义语句            | 77         |
| 习题                         | 79         |
| <b>第4章 VHDL 程序设计基础</b>     | <b>82</b>  |
| 4.1 VHDL 的描述风格             | 82         |
| 4.1.1 行为描述                 | 82         |
| 4.1.2 RTL 描述               | 83         |
| 4.1.3 结构描述                 | 84         |
| 4.2 组合电路的设计                | 86         |
| 4.3 时序电路的设计                | 92         |
| 4.4 基于 LPM 的设计             | 97         |
| 4.5 子程序                    | 102        |
| 4.5.1 过程                   | 103        |
| 4.5.2 函数                   | 105        |
| 4.5.3 子程序重载                | 107        |
| 习题                         | 109        |
| <b>第5章 VHDL 设计进阶</b>       | <b>113</b> |
| 5.1 进程使用要点                 | 113        |
| 5.2 不同工作方式的时序电路的设计         | 118        |
| 5.2.1 时钟信号与置位/复位信号         | 118        |
| 5.2.2 时序逻辑电路的设计            | 122        |
| 5.3 双向电路和三态电路的设计           | 142        |
| 5.3.1 三态门电路                | 142        |
| 5.3.2 单向总线缓冲器              | 143        |
| 5.3.3 双向总线缓冲器              | 144        |
| 5.4 有限状态机                  | 145        |
| 5.4.1 有限状态机简介              | 146        |
| 5.4.2 有限状态机的设计             | 147        |
| 习题                         | 154        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| <b>第 6 章 VHDL 设计实践</b> .....     | 155 |
| 6.1 MAX+plus II 使用入门 .....       | 155 |
| 6.1.1 MAX+plus II 的功能 .....      | 155 |
| 6.1.2 MAX+plus II 软件使用流程 .....   | 157 |
| 6.2 综合设计实例 .....                 | 172 |
| 6.2.1 出租车计费器的设计 .....            | 172 |
| 6.2.2 多功能数字钟的设计 .....            | 179 |
| 6.2.3 交通灯控制器的设计 .....            | 190 |
| 习题 .....                         | 200 |
| <b>附录 A VHDL 关键字</b> .....       | 201 |
| <b>附录 B GW48 实验系统原理与使用</b> ..... | 202 |
| B.1 GW48 系统使用注意事项 .....          | 202 |
| B.2 GW48 系统主板结构与使用方法 .....       | 202 |
| B.3 实验电路结构图 .....                | 205 |
| B.4 GW48 系统结构图信号与芯片引脚对照表 .....   | 212 |
| <b>参考文献</b> .....                | 218 |

## 概 述

人类社会已进入高度发达的信息化社会,信息社会的发展离不开电子技术的进步。现代电子产品在性能提高、复杂度增大的同时,价格却一直呈下降趋势,而且产品更新换代的步伐也越来越快,实现这种进步的主要因素是生产制造技术和电子设计技术的发展。前者的代表是以微细加工技术为特征的集成电路,目前已进展到深亚微米阶段,可以在指甲大小的芯片上制造数亿个晶体管;后者的核心就是 EDA 技术,即 Electronic Design Automation(电子设计自动化)。

随着电子技术日新月异的发展,集成电路(Integrated Circuit, IC)从 20 世纪 60 年代的小规模(SSI)到中规模(MSI),70 年代初期推出了大规模集成电路(LSI),70 年代后期又研制出超大规模集成电路(VLSI)。伴随着集成电路的高速发展,各种设计、仿真、制造集成电路的工具也在高速发展。例如 EDA 技术、HDL(Hardware Description Language,硬件描述语言)技术、CPLD(Complex Programmable Logic Device)技术、FPGA(Field Programmable Gate Array)技术等,得到充分的应用,使得数字逻辑系统的设计由原来几乎截然分开的硬件设计和软件设计两大部分,成为方便的、自动的、整体的、从上而下的设计。例如,数字逻辑电路设计者可以利用这种 VHDL 语言来描述自己的思想,然后利用电子设计自动化 EDA 工具进行仿真,再自动综合到门级电路,最后利用 ASIC 或 FPGA 实现其功能。

本章将介绍集成电路的发展简史,集成电路 EDA 技术,VHDL 语言的基本概念和数字逻辑系统的设计方法,FPGA/CPLD 的结构和原理等。

### 1.1 集成电路概况

集成电路是在 20 世纪 50 年代末 60 年代初发展起来的一种新型半导体器件。所谓集成电路就是在一小块硅单晶片上,利用半导体工艺制成许多半导体二极管、三极管、电阻、电容等元件,并连接成特定的电子电路,完成相应的功能,习惯上也把这种小晶片称作

芯片(chip 或 die)。因此它实质上就是制作在一个硅单晶片上的微型半导体电子线路。这种新型电子器件在体积、重量、耗电、寿命、可靠性和电性能等方面更优于传统的半导体分立元件电路(见图 1-1)。

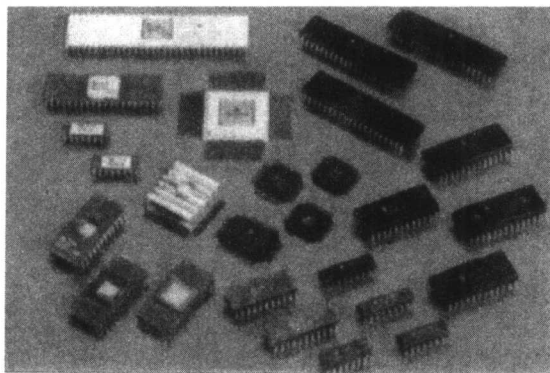


图 1-1 各种集成电路芯片

### 1.1.1 集成电路发展简史

在 20 世纪 50 年代初,随着电子设备和系统的日益复杂化,电子设备和系统所需要的元器件的数量日益增多,分立元件渐渐满足不了这样的要求。1952 年英国的达默(Dummer)首先提出了集成电路的设想。6 年之后,美国德克萨斯仪器公司的其尔比(Kilby)和仙童公司于 1958 年研制成第一个集成电路(见图 1-2)。1959 年美国仙童公司的赫尔尼(Hoerni)等人发明了硅平面工艺,于是奠定了半导体集成电路发展的基础。从此分立元件电路进入了集成化的时代,促成了电子技术的飞速发展。

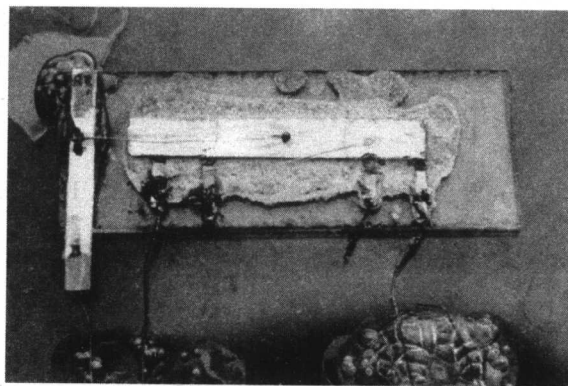


图 1-2 第一块集成电路

1965年前后,小规模(Small Scale Integrated Circuit, SSI)和中规模集成电路(Medium Scale Integrated Circuit)的相继问世,1971年大规模集成电路(Large Scale Integrated Circuit)的推出,以及20世纪70年代后期人们又研制出超大规模集成电路(Very Large Scale Integrated Circuit),对空间技术、计算机行业、天文、物理、数学、医学、生物等各行各业起到了无可比拟的推动作用,使电子设备系统的体积、重量、耗电等成几万倍甚至几十万倍的减少,而精度与可靠性则成万倍的提高。

1960年,Intel公司的戈顿·摩尔(Gordon Moore)通过对过去近10年集成电路发展的总结,提出了摩尔定律,即集成电路芯片的集成度每一年翻一番,集成电路的最小特征尺寸以每3年减小70%的速度下降,价格每两年下降一半。事实证明,在1965年后的30年来这个定律是正确的。表1-1给出了集成电路特征参数的进展情况,反映了集成电路发展,其主要特点包括以下几个方面:

- 特征尺寸越来越小;
- 晶圆尺寸越来越大;
- 芯片上的晶体管数越来越多;
- 时钟速度越来越快;
- 电源电压越来越低;
- 布线层数越来越多;
- 输入/输出(I/O)的引脚越来越多。

表 1-1 集成电路特征参数的进展情况

| 年份<br>主要特征          | 1990             | 1997             | 1999             | 2001             | 2003             | 2006              |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 晶体管数/芯片             | $10^6 \sim 10^7$ | $11 \times 10^6$ | $21 \times 10^6$ | $40 \times 10^6$ | $76 \times 10^6$ | $200 \times 10^6$ |
| 线宽/ $\mu\text{m}$   | 1                | 0.25             | 0.18             | 0.15             | 0.13             | 0.1               |
| 时钟频率/MHz            | 75               | 750              | 1200             | 1400             | 1600             | 2000              |
| 芯片面积/ $\text{mm}^2$ | 50~100           | 300              | 385              | 430              | 520              | 620               |
| 金属布线层次              |                  | 6                | 6~7              | 7                | 7                | 7~8               |
| DRAM 容量             |                  | 256MB            | 1GB              | 1~4GB            | 4GB              | 16GB              |
| 最低供电电压/V            |                  | 1.8~2.5          | 1.2~1.8          | 1.2~1.5          | 1.2~1.5          | 0.9~1.2           |
| 最大晶圆直径/mm           | 150              | 200              | 300              | 300              | 300              | 300               |

表1-2给出了DRAM的发展年表,表1-3给出了微处理机发展年表。这两张表表示了集成电路创造了现代工业的一个奇迹。它代表着集成电路将向两个方向发展:一是在发展微细加工技术的基础上,开发超高速度、超高集成度的集成电路芯片;一个是利用先

进的工艺技术、设计技术、封装技术和测试技术发展各种标准和专用集成电路,特别是开发更为复杂的片上系统,不断缩小产品上市时间和产品更新换代时间。

表 1-2 DRAM 的发展年表

| 发布年代 | 存储容量  | 元件个数              | 特征尺寸/ $\mu\text{m}$ |
|------|-------|-------------------|---------------------|
| 1970 | 1KB   | $5.2 \times 10^3$ | 8.0                 |
| 1973 | 4KB   | $1.8 \times 10^4$ | 5.0                 |
| 1975 | 16KB  | $3.6 \times 10^4$ | 3.0                 |
| 1979 | 64KB  | $1.4 \times 10^5$ | 2.0                 |
| 1982 | 256KB | $5.4 \times 10^5$ | 1.5                 |
| 1985 | 1MB   | $2.3 \times 10^6$ | 1.0                 |
| 1988 | 4MB   | $8.5 \times 10^6$ | 0.8                 |
| 1990 | 16MB  | $3.4 \times 10^7$ | 0.6                 |
| 1994 | 64MB  | $1.4 \times 10^8$ | 0.35                |
| 1996 | 256MB | $5.6 \times 10^8$ | 0.25                |
| 1999 | 1GB   | $2.2 \times 10^9$ | 0.18                |
| 2001 | 2GB   | $4.4 \times 10^9$ | 0.15                |

表 1-3 微处理器发展年表

| 发布年代 | 型 号         | 晶体管个数      | 特征尺寸/ $\mu\text{m}$ |
|------|-------------|------------|---------------------|
| 1971 | 4004        | 2 250      | 8.0                 |
| 1972 | 8008        | 3 000      | 8.0                 |
| 1974 | 8080        | 4 500      | 6.0                 |
| 1976 | 8085        | 7 000      | 4.0                 |
| 1978 | 8086        | 29 000     | 4.0                 |
| 1982 | 80286       | 134 000    | 1.5                 |
| 1985 | 80386       | 275 000    | 1.5                 |
| 1989 | 80486       | 1 200 000  | 1.0                 |
| 1993 | Pentium     | 3 100 000  | 0.8                 |
| 1995 | Pentium Pro | 5 500 000  | 0.6                 |
| 1997 | Pentium II  | 7 500 000  | 0.35                |
| 1999 | Pentium III | 24 000 000 | 0.25                |
| 2000 | Pentium IV  | 42 000 000 | 0.18                |
| 2002 | Pentium IV  | 55 000 000 | 0.13                |

近年来,集成电路的工艺、技术等仍在发生突变,集成电路的集成度在大大提高。集成度的提高使得硬件运行的速度大幅度提高,导致电子设备、计算机等处理工作的容量在大幅度上升。有人预言到本世纪末,单片集成度的容量将超过 42 亿个元器件,制造工艺将采用原子级加工技术。

集成电路的技术进步日新月异,小小的集成电路迅速彻底地改变了人类社会,成为信息社会发展的基石。目前,集成电路的发展规模与技术水平已成为衡量一个国家综合实力的标志。

### 1.1.2 集成电路的分类

早期生产的集成电路都是双极型的,1962 年后出现了金属-氧化物-半导体(MOS)场效应管组成的 MOS 集成电路。此后,双极型和 MOS 型集成电路一直处于相互竞争、相互促进、共同发展的状态。MOS 集成电路具有功耗低、尺寸小、很适合于大规模集成等优点,但速度没有双极型快。作为广泛的应用,MOS 集成电路在市场中占有相当大的比例。但作为特殊的要求,双极型集成电路在市场上仍占据着 MOS 管不可替代的角色。

在早期 MOS 技术中,铝栅 P 沟道 MOS 管是最主要的技术,20 世纪 60 年代后期,多晶硅取代铝成为 MOS 管的绝缘栅材料。70 年代中期,利用 LOCOS 隔离 NMOS 集成电路开始商品化。由于 NMOS 器件具有可靠性好、制造成本低的特点,NMOS 技术成为 20 世纪 70 年代 MOS 技术发展的主要推动力。对于在 60 年代提出的 CMOS 工艺,在 80 年代迅速成为超大规模集成电路的主流技术。由于 CMOS 具有功耗低、可靠性好、集成度高等特点,目前 CMOS 已成为集成电路的主流工艺。

按照导电类型分类,集成电路可分为双极型,MOS 单极型和单、双极混合型,即 BiMOS 和 BiCMOS 集成电路。

#### (1) 双极型集成电路

这种集成电路采用的是双极晶体管。双极晶体管是依赖于电子或空穴作为导电的载流子而工作的,它是电流控制元件。双极型集成电路的特点是速度高、驱动功能强,缺点是功耗大、集成度相对 MOS 较低。

#### (2) 金属-氧化物-半导体(MOS)集成电路

这种集成电路采用的是 MOS 管。MOS 管是由金属-氧化物-半导体所构成的栅极、源极和漏极所形成的场效应管,它主要靠半导体表面电场感应所产生的导电沟道工作。为了和双极型晶体管有所区别,也称为单极晶体管。根据 MOS 晶体管类型的不同、结构的不同、导电沟道的不同,MOS 集成电路又可分为 NMOS、PMOS 和 CMOS 集成电路。与双极型集成电路相比,MOS 集成电路具有输入阻抗高、抗干扰能力强、功耗小(约为双极集成电路的  $1/10 \sim 1/100$ )、集成度高(适合于大规模集成)的优点。因此,进入超大规模集成电路时代以后,MOS 特别是 CMOS 集成电路已经成为集成电路的主流。

### (3) 双极-MOS(BiCMOS)集成电路

该集成电路结合双极型和单极型的结构,即该集成电路有双极型管,又有 MOS 管,这样,BiCMOS 集成电路综合了双极型集成电路的工艺,又需要 MOS 集成电路的工艺,所以工艺复杂,造价高。随着 CMOS 集成电路中器件特征尺寸的减小,CMOS 集成电路的速度越来越高,已经接近双极集成电路,因此,集成电路的主流技术仍然是 CMOS 技术。

按功能和用途分类,集成电路可分为数字集成电路和模拟集成电路两类。

#### (1) 数字集成电路

这是发展最早最快的一种集成电路。数字集成电路用以产生和处理各种在时间上和数值上离散取值的数字信号,其内部主要是由各种门和触发器组成的逻辑电路。它所要求的晶体管工作在转换和传输信号状态,即工作在开关状态,而不像在模拟电路中晶体管工作在信号放大状态。因此,在数字电路中所用到的晶体管的要求主要是速度快,抗干扰能力强。数字集成电路的主要逻辑部件有运算器、译码器、编码器、计数器、存储器和位移寄存器等。采用的电路结构主要有三极管-三极管逻辑电路(TTL)、集成注入式逻辑电路(I<sup>2</sup>L)和发射极耦合式逻辑电路(ECL)等。电路形式简单,重复单元多,制造容易,是目前超大规模集成电路的主流。

#### (2) 模拟集成电路

这是在数字集成电路的基础上发展起来的一种集成电路。模拟集成电路是用以产生、放大和处理在时间和数值上都连续的模拟信号。模拟集成电路可分为线性模拟集成电路和非线性模拟集成电路。

① 线性模拟集成电路的输出信号和输入信号具有线性关系。例如各种类型的放大器,通用运算放大器和高速高压高阻以及低功耗、低漂移、低噪声等各类特殊运算放大器、宽频带放大器、功率放大器等。

② 非线性集成电路放大器的输出信号和输入信号的关系是非线性的。例如集成锁环电路,集成时基电路,集成模拟数字(A/D)转换和集成数字-模拟(D/A)转换电路,集成电压比较器,集成采样保持电路等。

集成电路按结构类型分类见图 1-3,器件类型的详细分类见图 1-4。

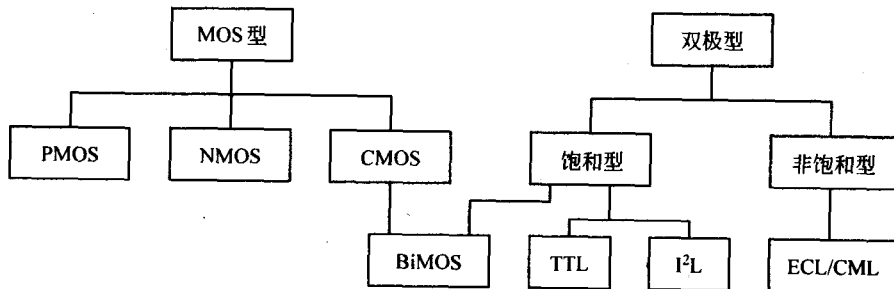


图 1-3 集成电路的结构类型分类

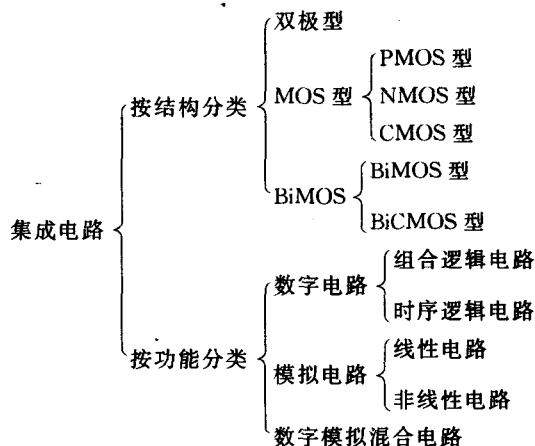


图 1-4 器件类型的详细分类

按集成度分类,集成电路可分为小规模集成电路(SSI)、中规模集成电路(MSI)、大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)。对于数字集成电路,通常认为:在  $1\sim 3\text{mm}^2$  的硅片上制作数十个元器件的集成电路即为 SSI;在  $10\text{mm}^2$  的硅片上制作数百个元器件即为 MSI;在  $10\sim 20\text{mm}^2$  的硅片上制作数千个元器件的即为 LSI;而在  $20\text{mm}^2$  以上的基片上制作上万个器件即为 VLSI。对于模拟集成电路,由于工艺要求高,电路复杂,通常集成 50 个以下元器件即为 SSI,50~100 个元器件为 MSI,集成 100 个元器件以上的就属于大规模集成电路。集成电路的各阶段集成度见表 1-4。

表 1-4 各阶段集成度表

| 类 别  | 数字集成电路集成度       |          | 模拟集成电路集成度 |
|------|-----------------|----------|-----------|
|      | MOS IC          | 双极 IC    |           |
| SSI  | $<10^2$         | $<100$   | $<30$     |
| MSI  | $10^2\sim 10^3$ | 100~500  | 30~100    |
| LSI  | $10^3\sim 10^5$ | 500~2000 | 100~300   |
| VLSI | $10^5\sim 10^7$ | $>2000$  | $>300$    |
| ULSI | $10^7\sim 10^9$ |          |           |
| GSI  | $>10^9$         |          |           |

集成电路可按通用的标准产品集成电路和专用集成电路分类。标准产品集成电路是指那些通用集成电路、标准逻辑电路和微处理器等;专用集成电路是面向用户、面向专门用途、面向特殊应用的专用集成电路。图 1-5 为集成电路按通用的标准产品集成电路和专用集成电路的分类。