

FPGA系统设计

杨昌旗 © 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

FPGA 系统设计

杨昌旗 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

FPGA 系统设计 / 杨昌旗著. -- 天津 : 天津科学技术出版社, 2021. 4

ISBN 978-7-5576-8942-1

I. ①F… II. ①杨… III. ①可编程序逻辑器件-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TP332.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 062496 号

FPGA 系统设计

FPGA XITONG SHEJI

责任编辑: 吴文博

责任印制: 兰 毅

出 版: 天津出版传媒集团
天津科学技术出版社

地 址: 天津市西康路 35 号

邮 编: 300051

电 话: (022) 23332377

网 址: www.tjkjbs.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 天津市隆达印刷有限公司

开本 787×1092 1/16 印张 18.75 字数 450 000

2021 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 58.00 元

这是一本经历了多年思考、专门为有志于学习大规模集成电路技术的门外汉写的书，尤其适合非电类的理工科学生。

根据这么多年的实践研究发现，电类的学生（比如通信工程、软件工程和计算机等专业）经过适当的培养训练，往往动手能力会很强，大学毕业后大多都可以很顺利地找到合适的工作。当然这主要和这些专业与社会需求、社会实践的联系的紧密性有很大的关系。

这个世界由很多不同的行业组成。每一个行业都有相对应的专业。行业的繁荣、滞胀、衰退、萧条和复苏，是有周期更替的，这也意味着任何一个专业都是有生命周期的。一个和时代需求紧密匹配的专业当然具有很强大的生命力。比如 20 世纪 50 至 60 年代，那个时候什么专业最有生命力？毫无疑问，当然是核物理、理论物理等相关专业。因为当时处在冷战的恐怖阴影之下，研究原子弹必然是各个大国最优先的事项。换到当下的时代背景之下，共享单车大战刚刚告一段落，ofo 已经破产，摩拜已不见踪影，华为开始进军自动驾驶，这个时候如果有哪个家长送孩子去读核物理或理论物理专业，大概只有三种可能性，要么是真的不懂，要么是真的无奈，要么是真的热爱。

一个电类专业的学生，比如通信工程专业，本科阶段要学习的东西是很多的。编程类的包括 C、Basic、VC、VB，电路类的课程包括模电、数电、高频、HDL，软硬件协同类的包括汇编、DSP、FPGA，等等。这每一门课程都需要强度很大的基础知识学习（听课和做习题）和实践操作训练（动手能力的培养）。以上课程都是电类专业毕业的本科生毕业以后从事硬件工程师的工作应该掌握的专业技术知识。

对于理工科院校许许多多非电类专业的学生来说，大学的课程学了几十门，说是要做一个什么事情说得头头是道，真正到具体要着手去做了，却茫然不知所措不知该如何入手。其实对于理工科学生来说，无论是做无人机开发还是做有人飞行器设计，无论是参加全国电子设计大赛还是到就业单位开发某个产品，遇到的问题无非是算法思想、电路设计、机械设计、计算机编程、光学设计，逃不出这几类。一个机械学院毕业的学生，他可能设计一个普通的机械结构没有太大难度，但光是一个普通的机械结构的设计，这种领域已经饱和了，如果是要设计一个类似波士顿动力那样的机器人的机械结构，可能机械学院毕业的学生就会感到吃力。同样的，一个通信学院毕业的学生，他可能设计一个普通的模拟和数字电路都没有太大难度，但光是一个普通的电路的设计，这种领域也已经饱和了，薪资水平很低，如果是要设计一个类似波士顿动力那样的机器人的电机控制结构，如果是要设计一个 5G 的芯片，可能通信学院毕业的学生也会感到吃力。再同样的，一个理学院

毕业的学生，无论是物理类的专业，还是光学类的专业，要是问物理学的一些理论，说说什么是波粒二象性，说说拉曼散射的原理和布里渊散射的原理，他会说得头头是道，但若是让这些学生做一些简单的项目，比如开发一个路口的交通灯、根据拉曼散射的原理开发一个工厂烟囱的废气含量实时监测仪、监测一下天空某星等等级的恒星的数目，他都不知该如何入手。更不要说让他们去开发太空中能对双子星的爆发进行监测、能实时探测太空微弱信号的光学望远镜。更不要说让物理和光学专业的学生去开发中国目前最需要的光刻机。

也就是说，每年将近一千万的本科毕业生已经把传统的理工科的领域挤压的极度饱和了，将三五十年前的课程原封不动，或者稍作修改的继续再原样讲个三五十年，这是明显不合时宜的。传统的理工科领域已经是红海了，竞争很严重，工作岗位严重短缺，平均薪资水平持续丧失吸引力，红海领域的人才已经有严重的溢出效应。所以这才有了“大众创业，万众创新”的提法。所以这才有了高校提出的“大学毕业生要转换就业思路”的提法。

对于理工科学生的培养，应该要立足于国家的战略需求，立足于服务国家的自主创新。这是一个蓝海领域。5G、半导体、大数据、云计算、自动驾驶、人工智能都是属于这个蓝海领域。尤其是2020年中美贸易战开打，美国对中国芯片设计巨头华为的封杀，使得国家对半导体领域完全自主可控的战略需求越来越强。

为什么理工科专业的一届又一届毕业生都很难找到满意的工作？我多年来一直在思考这个问题。十几年前我给本科生开设了《FPGA设计》这门课。FPGA芯片的开发是一时使用硬件描述语言编程来对半导体芯片进行开发的技术。它只需要有简单的数字电路的基础。一个大一的本科生，学习几周的数字电路，再对照本书学习FPGA芯片的相关开发知识，利用课余时间或寒暑假到公司里去实习一段时间，经过几个项目的培训，前后不超过半年，就能独立的完成一个芯片开发项目，设计开发出一样东西，做成一件事情。这是一个国家的战略需求很强烈，市场的人才缺口很大，入门基础很宽松，学到的东西很有用，能长期三五十年做下去的行当。

这是一个无论是理学院的学生，还是机械学院、材料学院、动力学院、通信学院的学生都能很容易上手学、并做出成果的方向。

通过对十几年的教学和工程实践的思考，历经2020年的国外的封锁打压和国家双循环战略的施行，我对以上问题的认识越来越清晰。所以才有了现在的这一本书。

希望本书的出版能为中国高校的莘莘学子提供一条人生发展方向的新思路，为这些对人生充满无限渴望和期待的孩子们铺设一条崭新的前进道路。

杨昌旗
2021年1月

第 1 章 绪 论	1
1.1 无线电报机	1
1.2 电报	3
1.3 晶体管	3
1.4 集成电路	6
1.5 摩尔定律	7
1.6 TTL	8
1.7 CMOS	9
1.8 英特尔	9
1.9 德州仪器	10
1.10 仙童半导体公司	11
第 2 章 FPGA 的开发流程	14
2.1 FPGA 的软件集成开发环境	14
2.2 FPGA 开发的第一个例子：点亮 LED 灯	21
第 3 章 硬件描述语言的历史	40
3.1 VHDL	40
3.2 Verilog HDL	42
3.3 目前 HDL 的发展状况	43
3.4 Verilog HDL 和 C 的比较	44
3.5 Superlog	45
3.6 SystemC	45
第 4 章 模块的基本结构	47
4.1 模块的基本结构	47
4.2 模块的 4 个主要部分	48
4.3 由顶向下的设计方法	50
第 5 章 HDL 建模	54
5.1 HDL 的建模抽象的五级模型分类	54
5.2 行为级建模	56
5.3 数据流建模	58

5.4	门级建模	60
5.5	行为描述和 RTL 描述的比较	65
5.6	Verilog HDL 与 VHDL 的建模能力的比较	66
5.7	建模的信号延迟	67
第 6 章	Verilog HDL 的语法结构	70
6.1	标志符	70
6.2	注释	70
6.3	整数、标量、向量和位宽	71
6.4	基本常量	72
6.5	数据类型	73
6.6	运算符	74
6.7	if 语句	83
6.8	case 语句	86
6.9	循环控制语句 forever、repeat、while 和 for	90
6.10	编译器指令	96
6.11	系统任务和系统函数	97
6.12	任务	100
6.13	函数	104
第 7 章	实例调用	115
7.1	门级实例调用	115
7.2	模块的实例调用	118
第 8 章	测试仿真	120
第 9 章	组合逻辑电路	125
第 10 章	时序逻辑电路	143
第 11 章	同步有限状态机	157
第 12 章	用户定义原语 (UDP)	170
第 13 章	CPLD 和 FPGA 的区别	180
13.2	PROM 的基本结构	182
13.3	PAL 和 PLA 的基本结构	182
13.4	GAL 的基本结构	183
13.5	CPLD 的基本结构	184
13.6	FPGA 的基本结构	185
第 14 章	FPGA 相关技术和产品	187
14.1	RAM	187
14.2	SRAM	187
14.3	DRAM	188

14.4	FLASH	188
14.5	SDRAM	189
14.6	AHDL	190
14.7	ASIC	190
14.8	SOC	192
14.9	Lattice 公司及其技术和产品	193
14.10	ACTEL 公司及其技术和产品	195
14.11	Cadence 公司及其技术和产品	196
14.12	Altera 公司及其技术和产品	196
第 15 章	Quartus II 软件的开发流程	202
第 16 章	FPGA 最小系统	217
第 17 章	专题研究	230
17.1	专题 1—Verilog 的综合原则	230
17.2	专题 2—竞争与冒险	231
17.3	专题 3—模块设计的基本原则	234
17.4	专题 4—阻塞赋值和非阻塞赋值的区别	235
17.5	专题 5—组合逻辑设计中容易出现的问题	240
17.6	专题 6—时序逻辑电路设计的注意事项	243
17.7	专题 7—if-else 语句和 case 语句综合电路的优先级比较	246
17.8	专题 8—4 位加法器树形成的乘法器	247
17.9	专题 9—格雷码与二进制码的转换	249
17.10	专题 10—7 段显示译码器设计	253
17.11	专题 11—对真值表建立模型	256
17.12	专题 12—基于 LFSR 的伪随机数生成方法	258
17.13	专题 13—数字跑表	262
17.14	专题 14—扰码器和解扰器	267
17.15	专题 15—读写双端口 RAM	273
17.16	专题 16—总线的读写	275
17.17	专题 17—帧结构指针信号的生成	278
17.18	专题 18—以太网数据帧的发送	279
17.19	专题 19—进程间的相互通信实例 1	283
17.20	专题 20—进程间的相互通信实例 2	285
17.21	专题 21—奇偶分频器	288
参考文献	292

第1章 绪论

这是一本为门外汉介绍 FPGA 开发技术的书，默认读者已经修过基础的数字电路的知识，至少知道真值表、与或非门、寄存器等是什么。如果事先没有修过基础的数字电路的知识也没有关系，任意找一本数字电路的书籍，迅速熟悉一下以上知识就可以了。

这个世界的发展步伐实在是太快，科技产品更新换代远远超乎了我们的想象。大规模集成电路已经悄无声息的渗透到我们每一个人的生活当中。无论你有没有意识到，我们每一天都在接触到当代最流行的技术。智能手机、智能电视、wifi、汽车导航、ipad、云计算，无一不藏着大规模集成电路技术的身影。

大规模集成电路技术的发展不是一个短暂的过程。始自很多年前的无线电报、电子管计算机、C 语言等等一长串技术的发展，涓涓细流，最后汇集到一起，形成今天的大规模集成电路技术。大规模集成电路技术是一种集合了无数创新和心血的结晶，过去是、现在是、未来还必将继续燃烧无数科技工作者的心血来为它添砖加瓦。FPGA 就是大规模集成电路技术的最杰出代表。

这一章，我们将简要回顾百十年来众多电路技术上的伟大创新，期望为读者寻根溯源：现在的 FPGA 技术究竟是经历了如何的锤炼，才造就了今天众望所归的辉煌。

1.1 无线电报机

让我们把时间拉回到 19 世纪末。1874 年，马可尼出生于意大利的一个富裕家庭。在欧洲，早期的很多科学家都是出生于名门贵族，比如笛卡儿、伽利略、阿伏伽德罗、达尔文、法拉第、麦克斯韦等。因为只有具有充足的财力物力支持，再加上个人的闲情雅致，才有可能做出伟大的发现。科学发现这棵大树是不可能建立在贫瘠的荒漠之上的。也许是来自于马可尼从小培养的独立思考和独立创新的习惯，再加上他小时候有机会经常陪母亲漂洋过海去探亲访友，见多识广以后，创新的种子开始生根发芽。在远洋旅途中，当船只航行在一望无际的大海上时，常常遇到一些意想不到的麻烦，可是又无法和陆地及其他正在航行的船只取得联系。没事就爱瞎琢磨的马可尼就想啊，有没有这样一种通信工具，当船在海上航行时，也能和陆地相互之间联系呢？这个想法一直萦绕在他心里。

1894 年，马可尼 20 岁的时候，他偶然在一本电磁杂志上了解到了赫兹对于电磁波的研究。这彻底的唤醒了马可尼自少年时代就深藏在他心底的幻想。想象这个东西，如果你

仅仅是去想想而已，那它就叫作幻想；如果你能进而尝试去做，那它就叫作梦想。如果你梦想的这个东西真的很伟大，那它就摇身一变，有了一个很高尚的名字，叫作理想。我们的共产主义的伟大理想不就是这么来的吗？马可尼啊，如果使用电磁波传递莫尔斯电码，不就可以不再依赖电缆吗？他极力说服父亲，并从他那里获得了所需要的一切财政支持。接下来，他就开始在他父亲的庄园里进行无线电报的实验。依靠自己在发明方面的天分和勤奋的工作，经过一次次电磁波的发送和接收实验，没过多久，马可尼实现了能在140米的距离间进行通信。经过不断的改进，时间一晃到了1895年的夏天，马可尼在他父母住宅的楼顶和1.7公里之外的山丘之间进行了通信实验，并取得了成功。此时，马可尼才21岁。1909年，马可尼（图1.1）与布劳恩一起获得诺贝尔物理学奖。1937年逝世。



图 1.1 马可尼与无线电报

马可尼的成功告诉我们一个做科研的道理：做科研，要经常读一下最前沿的研究杂志，知道当前最前沿的思想、最尖端的技术。科研，一定要站在前人的肩膀上。如果没有看到赫兹的研究，马可尼最初可能就要走很长很长的弯路。

如图1.2所示是马可尼设计的无线电报的实验装置原理图。发射部分包括电池组、莫尔斯电键、变压器和发射天线组成；接收部分包括接收天线、粉末检波器、电池组和自动敲击装置组成。

无线电发报装置借鉴了当年赫兹的实验装置。当按下莫尔斯电键的时候，变压器的次级线圈电流被一个与电铃相似的“继电器”周期性地通断，每一次断流都在次级线圈内产生一个很高的感应电压，线圈两端就会产生瞬时高压，于是两个金属小球间就会迸发出电火花，这些火花产生的电磁振荡就会通过天线向外发射电磁波。这种最原始的电磁波发射器后来被称为“火花振荡器”。

马可尼的无线电报接收装置采用了法国物理学家布兰利的发明成果——粉末检波器。粉末检波器有一个很细的玻璃管，管中装有细小的金属屑，两端各有一个电极，当有电磁波传过来时，在两端的电极上产生感应电势，金属屑会互相吸引而彼此黏结起来。于是检波器呈导电状态。如果粉末检波器还有一个自动敲击装置，在没有电磁波信号时，金属屑

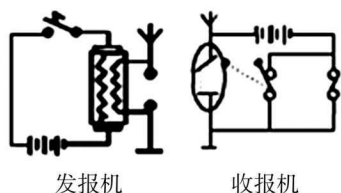


图 1.2 马可尼的无线电报装置

往往仍保持粘连状态而不能马上分离。敲击装置能自动敲击以产生振荡使瓶内的金属屑得以马上分开。当粉末检波器接收到信号而导电，电报机上就有电流流过，并会自动在电报纸上打出莫尔斯电码的“点”和“划”来。这样发射端发出的莫尔斯电码文就可以在接收端反应出来。

1.2 电报

电报 (telegraph) 利用了电磁波作为通信的载体。这样一种能让远距离相隔的人相互之间传输与交换信息的通信方式使用了编码以及后续一些电处理技术。19 世纪的 30 年代末，美国的莫尔斯首先进行了电报通信试验，实验很成功。

这种编码方式就是莫尔斯码。它是这么实现编码的：把英文词典里普通人经常用到的单词都写出来，大概有 4 千个左右的英文单词。计算这些英文字母表中的字母、标点符号和空格出现的频度，排个序。使用点和划的组合来代表这些字母、标点和空格。最简单的组合原则就是：使用频率最高的符号具有最短的点划组合；“点”对应着短的电脉冲信号，相当于发报机按键短时间按一下；“划”对应着长的电脉冲信号，相当于发报机按键按下去后持续接触一定时间再松开。这些信号传到对方，接收机接收到短的电脉冲信号以后，就翻译成“点”，接收到长的电脉冲信号以后就转换成“划”。译码员根据码本，把这些点划组合翻译成英文字母，从而完成了通信任务。

大家经常看二战和国共内战的影视，对电报的模样一定很熟悉。很明显，电报通信容量小，效率低。因此，随着技术进步，公众电报通信业务逐渐减少，用户电报、智能用户电报等新业务有逐渐取代公众电报业务的趋势；而电报通信的存贮转发和充分利用信道等特点正在数据通信等新业务中得到发展。对于一个普通家庭来说，以前发一封电报是很贵的。只有特别重要的事，才会用得到电报。著者的父亲是一位老邮电，90 年代，著者在离家几千公里之外求学的时候，很久没和家里通电话了，突然有一天课间，班长拿了一封电报给著者，同学们都很关心，围过来，以为出了什么大事。拆开看，父亲在电报里发了几个字：家里一切都好。

20 世纪 90 年代末，大概 1998 年、1999 年的样子，电报技术开始逐步在中国大陆退出历史舞台。

1.3 晶体管

每一部描述二战情节的电影都会有一个当时最高技术的装备—无线电报机。早期的无线电系统产生的信号仅仅只是依靠天线来取得。这种信号是很弱的，尤其是距离稍微远一

点，信号就非常弱了。后来，人类发明了真空管以及晶体管，学过模拟电路的都知道，晶体管这种电子设备，可以极大地放大微弱的信号。这迅速的普及了无线电。

晶体管的踪迹，从 1929 年就已经出现了。当时要做出的晶体管有一个特点，那就是既能够让信号电流沿着一个方向流动，又能阻止信号电流反向流动。那时候的工业技术水平还有很大的欠缺，很难制造出足够纯度的晶体管。最初的思路是不断地寻找不同的材料来实现这种晶体管。工程师们依次测试了电子管、矿石收音机的触须式检波器。

直到二次世界大战前夕，贝尔实验室的工程师终于发现微量掺杂的锗晶体有实现晶体管的潜力。

能一辈子致力于做科学研究的人，都应该是理科方面的通才。如果不是，那他或她这一辈子在科学领域里很大的概率要默默无闻了。无论是物理的、化学的、甚至是生物的等等，各个领域的知识不敢说全精通，至少在需要用到跨学科的知识的时候能立刻用得上，这是一个伟大科学家的基本素养，也是造就其成就的部分原因。有时候可以把这种跨学科的运用说成是运气，实际上哪有那么多的运气。天才的基因 99% 都是来自于汗水，只有 1% 来自妈妈的肚子。

贝尔实验室的工程师发现微量掺杂的锗晶体有实现晶体管的潜力这件事本身说明了什么？作为一个科学家，本能的反应应该是：锗元素的核外有四个自由电子，那么核外有四个自由电子的其他元素，比如碳、硅、锡、铅等，其单晶是不是也可以研究一下？由此，在二战期间，贝尔实验室开展的针对硅材料和锗材料的研究为后来晶体管的发明打下了很好的基础。

第二次世界大战结束之后，贝尔实验室成立了以肖克莱带领的团队专门针对硅和锗等半导体材料进行研究，成员包括巴丁、布拉顿等人。研究的目的是在这些材料上如何实现电流的放大。事物的发展有它自有的规律。这些科学家大都从事了很多年的半导体研究，具有丰富的经验，研究的过程中也逐渐摸索和认清了电流放大的基本思路。

到了 1947 年 12 月，世界上首个能把音频信号放大 100 倍的半导体问世了。尺寸大概有 3cm 长，4mm 粗。

今天的模拟电路的教材里都介绍到了三极晶体管，下面我们以 NPN 型三级晶体管来介绍其电流放大的基本原理。

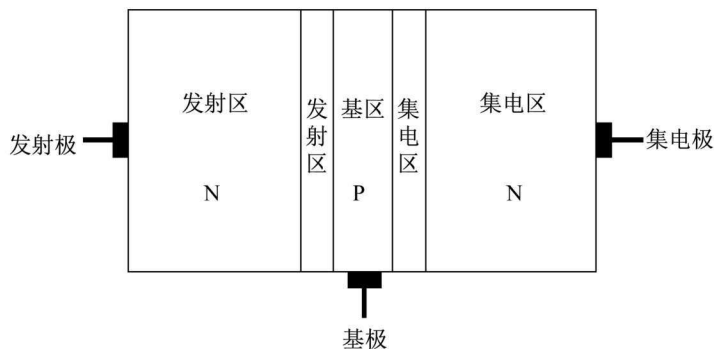


图 1.3 NPN 型三极管示意图

图 1.3 是 NPN 型三极管的结构图。它是把三种半导体组合到一起形成了 3 层结构，

从左至右依次为 N 型、P 型和 N 型半导体。

硅原子核外 4 个价电子和别的硅原子核外的 4 个价电子组成共价键结构。能自由移动的电子一个也不多、一个也不少。所以把硅单晶叫作本征半导体。

如果把硅单晶里的一些硅原子替换为核外有 5 个价电子的原子（替换的过程就是掺杂），5 个价电子拿出 4 个来与别的原子构成共价键结构，还多出一个价电子，这个价电子就是自由电子。电子带负电。所以把这种掺杂的半导体叫作 N 型半导体。N 型半导体的多数载流子就是电子。载流子的意思是这种东西（电子）的流动意味着电流的流动，电子流动的相反方向就是电流的方向。

如果把硅单晶里的一些硅原子替换为核外有 3 个价电子的原子，3 个价电子从别的地方拿过来一个电子总共拿出 4 个来与别的硅原子构成共价键结构。从别的地方拿的电子不是白拿的，电子离开的地方会留下空穴，拿了多少个电子就会留下多少个空穴。拿的越多，留下的空穴越多。空穴带正电。所以把这种掺杂的半导体叫作 P 型半导体。P 型半导体的多数载流子就是空穴。载流子的意思是这种东西（空穴）的流动意味着电流的流动，空穴流动的方向就是电流的方向。

P 型半导体和 N 型半导体连接的地方就是 PN 结。所以图 1.3 发射区和基区连接的地方就是发射结。图 1.3 集电区和基区连接的地方就是集电结。图 1.3 每个半导体的端点都有极，分别为发射极、基极和集电极，这是导线连接半导体的地方。

它的电压偏置是如下安排的：当基极（P）电压高于发射极（N）电压零点几伏时，发射结正向偏置。当集电极（N）电压高于基极（P）电压几个伏特时，集电极电压反向偏置。

在制造三极管时，有 3 点工艺上要注意的地方：（1）人为控制使得发射区的多数载流子浓度大于基区的多数载流子浓度；（2）基区要做得很薄；（3）严格控制杂质含量。

三极管通电以后，由于发射结正向偏置，发射区的多数载流子（电子）与基区的多数载流子（空穴）在电场作用下很容易地穿越过发射结向对方扩散。由于发射区的多数载流子的浓度大于基区的多数载流子的浓度，所以穿越过发射结的电流基本上是电子流，这股电子流就被称为发射极电流 I_e 。

由于基区很薄，加上集电结是反向偏置，注入基区的电子大部分穿越过集电结进入集电区，从而形成集电极电流 I_c ，只有很少一部分（大概小于 10%）的电子在基区与基区的空穴进行复合。基区外部连着引线，基区的空穴被电子在基区复合掉，基极的引线从外部信号引流补充基区的空穴。从而形成了基极电流 I_b 。

总的电流是守恒的。因此 $I_e = I_b + I_c$ 。这意味着只要基极不断的补充很小的电流 I_b ，在外部电压控制下（控制两个 PN 结的正偏和反偏），就可以在集电极上得到一个较大的电流 I_c 。这就是三极管电流放大的基本原理。 I_c 与 I_b 的比值就是电流放大倍数 β 。三极管是一种电流放大器件，但在实际使用中，通过电阻可以利用三极管的电流放大作用，转变为电压放大。

这种能放大电流的半导体的命名很有意思。三极管的基极输入是一种低电阻输入，集电极输出是高电阻输出（想想看，集电极和基极是反偏的，反偏意味着截止，输出电阻很大），这样一种电阻变换的特性，布拉顿给它取名为 trans-resistor（转换电阻），后来其英文就缩写为 transistor，翻译为中文就是晶体管（三极管）。

晶体管的出现，是 20 世纪的一项伟大成就。它完全替代了体积大、功耗大的电子管。1956 年，肖克利、巴丁、布拉顿三人，因发明晶体管而同时获得了诺贝尔物理学奖。图 1.4 是被世人尊称为晶体管之父的肖克莱。

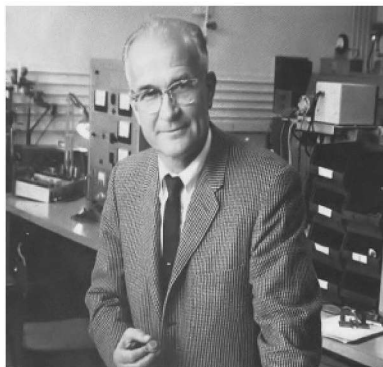


图 1.4 晶体管之父肖克莱

1.4 集成电路

晶体管发明之后，人类开始大量的使用二极管、晶体管这些半导体器件。当时做的还是分立的器件。后来有人就设想能不能把这些半导体器件集成起来实现。

基尔比早在 1958 年 7 月就初步有了这方面的电路集成化的想法。基本思路就是：在一个非常小的半导体晶片或者介质的基片上，通过采用一定的工艺（比如说刻蚀），把实现一个电路必须的晶体管、二极管、电阻、电容和电感等元件及元件的连线互相连接在一起，然后封装在一个管壳内。这样一个电路就具有了基本电路的功能。因为所有元件都是集成起来的，功耗很低，体积很小，相应的可靠性很高。基尔比在 1958 年 10 月 12 日展示了世界上第一个能够正常工作的集成电路。他展示的集成电路包括一个双极性晶体管，三个电阻和一个电容。基尔比发明的是基于硅材料的集成电路。

基尔比展示他的发明的半年后，诺伊思也展示了他发明的基于锗材料的集成电路。世界上第一个集成电路的专利是诺伊思的。

2000 年，因为基尔比的贡献，他获得了当年的诺贝尔物理学奖。

目前的集成电路主要是 TTL 电路和 CMOS 电路。

相对于以前的分立元器件的电路，集成电路的优势很明显：体积小、功耗低、可靠、可以规模化生产。

晶体管刚诞生的时候是单个单个生产的。到了集成电路时代，生产晶体管就不是单个单个的了，而是通过照相平版技术，把芯片的所有组件作为一个单位进行印刷。这就导致了芯片的生产成本很低。因为器件分布很紧密，彼此靠近，连线很短，体积小，进而导致功耗低。现在每一平方毫米的面积可以容纳一百万个晶体管。

1.5 摩尔定律

1965年4月19日，在仙童半导体公司任职的工程师摩尔发表文章，预言每年半导体芯片上集成的晶体管和电阻的数量将增加一倍。这就是后人熟知的“摩尔定律”。

1975年，摩尔在国际会议上的论文，根据实际情况对摩尔定律进行了修正。预言每两年半导体芯片上集成的晶体管和电阻的数量将增加一倍。

现在大家普遍流行的说法是每18个月增加一倍。这意味着什么？意味着相同面积的晶圆下生产同样规格的集成电路，随着制程技术的进步，每隔一年半（也就是18个月），集成电路的产出量就可增加一倍。从成本的角度大致估算，也就是说每隔一年半，成本就可以降低50%，折算到每年成本可平均降低30%多。按照这个说法，摩尔定律意味着集成电路技术每隔两年多不到三年就要上一个台阶。

摩尔定律是用于简单评估半导体技术进展的经验法则。无论是一年一倍或者两年一倍，甚至是一年半一倍，其实多少个精确的月份并不重要，重要的是它意味着集成电路的制程技术都是在不断地以一条直线，甚至是指数的方式高歌猛进、向前发展。

集成电路的制程技术（生产）确实更迭得太快。集成电路的种类也有很多种，可以做成DSP和FPGA，也可以做成单片机和SOC，甚至还可以做成航天专用芯片。空调控制器可以有专用集成电路，汽车的电源控制、自动驾驶也都可以有专用集成电路。集成电路的开发技术（应用开发）可以应用的面也很广，FPGA可以做监控，做算法，做智能控制，可以用在工业的各个领域。这些领域是可以容纳非常多工程师的，而且只要学会了一种硬件描述语言，在一个领域开发出了产品（比如人工智能监控的FPGA算法），光是维护这个品类的产品就可以活很多年，而且活得很好。

摩尔定律这样一种隔一段时间密度翻倍的方式，让人感到很不安。毕竟，芯片内部器件的密度不能超越量子力学的极限。

全球芯片代工的龙头企业包括台积电、三星、联发科等企业。在2020年8月的时候，台积电已经在谋划5nm的芯片工艺。芯片工艺里的多少nm指的是晶体管的宽度，或者叫线宽。工艺越高级，线宽越小，单位面积可以排列的晶体管的数目就越多。同样尺寸的晶圆就可以造出更多的芯片。芯片尺寸越小，做出来的设备就越紧凑，功耗就越低。用惯了小巧灵活智能手机的人是绝对不愿意回过头去使用20世纪90年代的大哥大就是这么个道理。其他的国内的企业目前全自主的水平大概还在28nm的工艺。中芯国际包含美国技术的工艺能做到14nm。从28nm、14nm、7nm，一直到5nm，领头的台积电已经堵在5nm的地方，越是往前走，路越难走。

过去，摩尔定律的说法是每5年增长10倍，每10年增长100倍。现在，摩尔定律已经远远达不到这样的增长速度，每年只能增长可怜的几个百分点，10年时间才能增长2倍左右。摩尔定律事实上已经无效了。摩尔定律无效带来的直接后果就是研发费用和芯片厂建造成本成几何级数增长。90nm制程时，建厂和设备采购的成本也就是一百亿元人民币

币。到了 3nm 制程阶段，研发费用、建厂和设备采购等资本开支达到了万亿人民币的级别。

这为中芯国际等国内代工企业打开了一段很好的追赶超越的时间窗口。

但是你要相信，这世间有人、有资本、有贪婪的欲望的存在。所以，迟早资本的力量会冲毁这种芯片制程堰塞湖。很大的可能是用一种新的技术来取代现有的半导体集成电路技术。想想蒸汽机是如何颠覆马车的，想想数码相机是如何颠覆胶片照相机的。如果还仅仅是在目前代工工艺 5nm 的地方修修补补，是很难跨越过去的。得需要一种完全创新和颠覆的思路。半导体的存在主要还是要解决实际过程中电磁波信号的放大。结合前面我们提到的半导体 pn 结是如何实现电流放大的，如果有一种技术，比如光，能通过某种形式进行放大，同时体积又能像半导体工艺这般做得如此集成，那它就是一种突破。

原子的尺寸大概在 0.1nm。历史上任何技术的颠覆都会带来性能至少上一到两个台阶。蒸汽机火车是不是比马车快很多？数码相机是不是比胶片相机性能好几百倍以上？要在目前 5nm 的工艺性能上一个台阶，就几乎到达原子的尺度了。所以一种对半导体集成电路技术的颠覆也许会来自于物理领域的电子显微镜、隧道显微镜等能对原子分子进行搬运操作的技术领域。

1.6 TTL

TTL 的全称是 Transistor-Transistor Logic，是一种非常常见的逻辑门电路。它主要是由双极结型晶体管（Bipolar Junction Transistor，也就是晶体三极管，简称 BJT）和电阻构成。最早出现的 TTL 门电路是 74 系列，后来衍生出了很多子类，分别是 74H 系列、74L 系列、74LS、74AS、74ALS 等系列。所谓 74 系列指的就是这一系列芯片的名字都是以 74 开头。比如 7405 是 TTL 集电极开路六反相器，74121 是 TTL 单稳态多谐振荡器。我们在本书做的很多例子、设计的很多电路，在 74 系列芯片里都有对应的器件。

TTL 的功耗很大，CMOS 电路已经在逐步地取代 TTL。

根据应用领域来划分，TTL 门电路可以分为两个系列：74 开头的是商用的系列，54 开头的是军用系列的芯片。军用系列的芯片在芯片性能、可靠性上有很大的提高。

在电路开发的时候，有时候也会遇到“TTL 电平”。TTL 电平是针对数字逻辑电路来说的，一般规定 +5V 等价于逻辑“1”，0V 等价于逻辑“0”。目前还有很多计算机设备采用 TTL 电平作为通信的电平标准。实际使用的过程中，电压大于 2.4V 就认为是 TTL 高电平，电压小于 0.4V 就认为是 TTL 低电平。

1.7 CMOS

MOS指的是金属氧化物半导体（Metal-Oxide-Semiconductor）结构的晶体管，简称MOS晶体管。MOS晶体管分为P型MOS管和N型MOS管。由PMOS管和NMOS管共同构成的互补型MOS管即为CMOS（互补金属氧化物半导体，Complementary MOS）。

所以我们可以知道，数字集成电路按导电类型可分为双极型集成电路（主要为TTL）和单极型集成电路（CMOS、NMOS、PMOS等）。CMOS电路的功耗很低，单门静态功耗大概为纳瓦的数量级。

那么什么叫作单极型，什么又叫作双极型呢？

单极型数字集成电路中只利用一种极性的载流子（要么是电子，要么是空穴）进行电传导。它的主要优点是输入阻抗高、功耗低、抗干扰能力强且适合大规模集成。MOS电路又称场效应集成电路，属于单极型数字集成电路。MOS管的主导产品CMOS集成电路更是优点显著，静态功耗几乎为零，是目前集成电路的主流之一。

很明显，我们上一节提到的TTL就是双极型的了。

经常能看到的是4000系列的CMOS电路以及74系列的高速CMOS电路。74系列的高速CMOS电路又分为三大类：带有HC字样的为CMOS工作电平；带有HCT字样的为TTL工作电平；带有HCU的是适用于无缓冲级的CMOS电路。

1.8 英特尔

每次当著者提到英特尔这三个字的时候，都会肃然起敬。英特尔，这是一家历史悠久的集成电路公司。

1968年7月，Intel公司成立，公司名字Intel为“集成电子设备（integrated electronics）”的缩写。创始人为诺伊斯和摩尔。

1969年，第一个PMOS硅栅晶体管技术被英特尔开发出来。

1971年，英特尔发布了其第一个微处理器，取名叫作4004。尺寸为3.175mm 1.5875mm。容纳了2千个左右的晶体管。

1972年，英特尔发布了它的第一个8位处理器，取名叫作8008。

1978年，英特尔发布了它的第一个16位处理器，取名叫作8086。

1978年，英特尔把8086的改进版（也就是8088）微处理器销售给了IBM，IBM由此在其PC上使用了该处理器。8088大获成功。有很多汇编语言的书一直到现在，好多年都没有更新内容了，还在使用8086的相关概念做例题介绍。