

集成电路原理与应用

孙崇德 编著

人民邮电出版社

73.715
491
2

集成电路原理与应用

孙崇德 编著



人民邮电出版社

8510028

内 容 简 介

本书主要内容包括了数字集成电路与模拟集成电路两大类。数字集成电路中既包括了双极型集成电路的各种类型，又包括了 MOS 集成电路的各种类型，以及属于大规模集成电路的微处理机。模拟集成电路中包括了各种性能和各种用途的典型产品。

本书可供理工科大学无线电、自动化、电工、电机等专业作为教学参考书，也可供有关工厂的工程师和科研单位的研究人员参考。

Jichengdianlu Yuanli yu Yingyong

集成电路原理与应用

孙崇德 编 著

责任编辑：李洛童

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：850×1168 1/32 1984年3月第一版

印张：18 4/32 页数：290 1984年3月北京第一次印刷

字数：479 千字 印数：1—21,000册

统一书号：15045·总2782-无6256

定价：2.65元

前 言

二十世纪初,以电子管为代表的第一代电子器件的诞生,奠定了电子工业的基础,电子技术获得了巨大的进步。五十年代开始出现的晶体管,具有体积小、重量轻、功耗小、寿命长等优点,在很多方面逐步代替了电子管,成为第二代电子器件。但是,无论是第一代还是第二代器件,都是以分立的元器件组成电子设备的。六十年代初,人们采用半导体工艺或薄、厚膜工艺,把电路中的元器件以相互不可分离的状态制作在一块(或几块)半导体(或绝缘材料)基片上,然后封装在一个壳体内,构成一个完整的具有一定功能的电路——集成电路(IC)。它比分立元器件构成的电路体积要小得多,元器件的密度和电路的可靠性大大提高,实现了材料、元件和电路的三位一体,使电子器件进入了第三代。目前集成电路正在向更高的集成度发展,这就是电子器件的第四代——大规模(LSI)和超大规模(VLSI)集成电路。作为VLSI标志的每片超过 10^5 元件的目标已经突破,预计八十年代中期一个片子上将集成数百万个以上的晶体管。在一个片子上不仅可以做一台微型计算机,而且将有可能在一个片子上组合实现大型计算机系统。电子电路向集成电路方向发展,这是近代电子技术微型化的必然趋势。

本书是为理工科大学无线电、自动化、电工、电机类专业的本科学生和研究生提供的一本教学参考书,也可供有关工厂的工程师和科研单位的研究人员参考。在内容安排上,以系统地叙述各种集成电路为主线,以分析单元电路为重点,并注意反映近年来在集成电路方面的新成就、新器件、新内容。在写法上,力求从电路的内在规律阐明其改进和发展,强调基本概念,加强理论分析,努力贯

彻少而精和理论联系实际的原则。全书共分四章。

第一章主要介绍半导体的晶体结构和能带结构，集成电路中的单管特性与单元电路。

第二章主要分析双极型集成逻辑门、触发器、计数器、寄存器、译码器和数字显示的基本原理。并从TTL、STTL、 I^2L 、ECL中选出一些产品，介绍它们的电路特性和应用实例。另外还简要介绍了由与非门组成的多谐振荡器、单稳电路、脉冲整形及延时电路。

第三章主要讨论MOS反相器、触发器、计数器以及其它逻辑部件的工作原理，并从PMOS、NMOS、CMOS、E/DMOS中选出一些产品，介绍它们的电路特性和应用实例。对于微型计算机中的MPU、ROM、RAM和I/O接口的功能也作了适当介绍。

第四章着重分析集成化运算放大器、负反馈放大器、音频放大器和集成化稳压电源的工作原理，并从各种型号的模拟集成电路中选出一些产品、介绍它们的电路特性和应用实例，另外，对于用来完成检波、鉴频、解调等功能的模拟乘法器也作了扼要介绍。

考虑到科技人员自学的需要，各章内容有一定的相对独立性。每章开始都有内容提要，并附有若干思考题和习题。

本书在编写过程中，得到北京、上海等地有关工厂、研究所和兄弟院校的帮助和支持，李华金同志对全书进行了仔细的审阅，在此谨致以诚挚的谢意。

由于集成电路发展极为迅速，编者的学识有限，书中肯定有不少缺点和错误，敬请读者批评指正。

孙崇德

目 录

第一章 集成电路基础知识

1-1 集成电路简介	1
一、半导体集成电路	3
二、膜集成电路	6
三、大规模集成电路	8
1-2 半导体的物理性质	10
一、硅(锗)半导体的晶体结构和能带结构	11
二、半导体的费密分布	16
三、杂质在半导体中的作用	19
四、迁移率与电阻率	23
1-3 PN 结	26
一、PN 结空间电荷区的形式	27
二、PN 结的伏安特性	31
三、非平衡载流子	39
四、PN 结电容	45
五、PN 结击穿	49
1-4 晶体管原理和特性	53
一、晶体管的放大原理	55
二、基本放大电路	60
三、集成电路中的偏置电路	72
1-5 集成电路中元器件的隔离	77
一、PN 结隔离	77
二、二氧化硅介质隔离	80
1-6 集成电路中的元器件	85

一、集成电路中的晶体管	85
二、二极管	90
三、电阻器	96
四、电容器	101
1-7 膜集成电路的制造工艺	103
一、厚膜电路的工艺流程	103
二、薄膜电 的工艺流程	106
1-8 集成电路的封装	108

第二章 双极型数字集成电路

2-1 逻辑门和逻辑代数	110
一、基本逻辑门电路	111
二、逻辑代数	118
2-2 集成逻辑门电路	127
一、DTL 与非门电路	127
二、HTL 与非门电路	129
三、TTL 与非门电路	133
四、TTL 门电路的主要参数	144
五、浅饱和 TTL 电路	153
六、集电极开路输出与非门	156
七、三态输出器	159
八、抗饱和 TTL 电路	160
九、ECL 门电路	163
十、I ² L 电路	168
2-3 集成触发器	174
一、集成门电路组成的触发器	174
二、集成单元触发器	190
2-4 集成与非门组成的脉冲电路	202
一、自激多谐振荡器	202
二、单稳态触发电路	206
三、波形整形电路	210

2-5 基本逻辑部件	216
一、计数器	216
二、移位寄存器	230
三、译码器	237
2-6 TTL 集成电路的使用	242
一、TTL 电路使用中的一般注意事项	242
二、空端的处理方法	244
三、和其它元器件的连接	244
四、电路设计时应考虑的问题	248
五、防止接点的抖动	249

第三章 MOS集成电路

3-1 MOS 晶体管的工作原理	254
一、MOS晶体管的工作原理	254
二、MOS晶体管特性曲线和特性方程	258
三、MOS晶体管的微变等效电路	266
四、MOS晶体管的主要参数	270
3-2 MOS 反相器	277
一、MOS 反相器的基本类型	277
二、P 沟道增强型 MOS 反相器	280
3-3 PMOS 门电路	287
一、与非门电路	287
二、或非门电路	290
三、与或非门电路	290
四、与门和或门电路	292
五、异或非门电路	293
3-4 MOS 触发器	294
一、基本触发器	294
二、W-Z 触发器	297
三、主从触发器	298
3-5 基本逻辑部件	305

一、寄存器和移位寄存器	305
二、计数器	312
三、译码器	316
附 录 长途电话自动计时器	318
3-6 CMOS 集成电路	320
一、CMOS 反相器	321
二、时钟 CMOS 反相器	331
三、CMOS 传输门	331
四、CMOS 门电路	334
五、CMOS 触发器	338
六、计数器和译码器	341
3-7 E/D MOS 电路	345
一、工作原理	346
二、开关速度	348
三、 4×3 与非门和或非门	351
3-8 动态逻辑电路	352
一、MOS 动态门电路	352
二、动态移位寄存器	354
三、MOS 动态触发器	358
四、MOS 电路使用中注意事项	363
3-9 数字显示	364
一、气体放电数字显示器件	364
二、荧光粉显示器件	371
三、半导体显示器件	375
四、液体数字显示器件	379
3-10 M 6800 微处理机与微型计算机	383
一、M 6800 微型计算机的组成	384
二、MC 6800 微处理机	387
三、MCM 6810 静态随机存取存储器	395
四、MCM 6830 屏蔽程序型只读存储器	397
五、MC 6820 外围接口适配器	399

六、MC 6850 异步通信接口适配器	402
七、MC6860.....	404

第四章 模拟集成电路

4-1 差分放大器	407
一、差分放大器的工作原理	407
二、差分放大器的传输特性和跨导	412
三、差分放大器的失调和温度漂移	416
四、集成化差分放大器	422
4-2 负反馈放大器	434
一、负反馈对放大器性能的影响	435
二、采用负反馈放大器的集成电路举例	441
三、负反馈放大器与差分放大器的比较	447
4-3 运算放大器	448
一、集成运算放大器的基本结构	448
二、集成化运算放大器举例	466
4-4 集成运算放大器的应用	483
一、集成运算放大器在信号运算电路中的应用	484
二、集成运算放大器在信号发生电路中的应用	496
4-5 集成运算放大器的实际使用	502
一、调零与消振	502
二、保护措施	507
三、减小失调漂移	509
四、增大输出电流和输出电压	510
五、驱动 TTL 电路	513
附录：几种常用集成运算放大器	517
4-6 集成化稳压电源	530
一、单片集成稳压器	530
二、集成稳压器的实例	536
三、保护电路	552
四、集成运算放大器组成的稳压电源	557

4-7 集成化音频放大器	559
一、M 5101 S 集成音频放大器	559
二、WC 334 T 集成功率放大器	560
三、5 G 31 集成功率放大器	562
四、5 G 37 集成功率放大器	564
参考文献	567

第一章 集成电路基础知识

内 容 提 要

本章主要介绍半导体的晶体结构和能带结构，集成电路中的单管特性与单元电路以及集成电路的隔离与器件，为学习集成电路作准备。

1-1 集成电路简介

集成电路是采用半导体工艺或薄膜、厚膜工艺，把电路元器件以相互不可分离的状态制作在一块（或几块）半导体（或绝缘材料）基片上，然后封装在一个壳体内，构成一个完整的具有一定功能的电路。

集成电路按其工艺不同，可分成半导体集成电路（又称单片集成电路）、膜集成电路（薄膜集成电路、厚膜集成电路）和混合集成电路。但目前实际出现的集成电路中，以单元集成电路和混合集成电路两类较多。这一方面由于有源元件需要用半导体制作，用薄膜工艺制作晶体管和二极管还未达到工业生产水平，另一方面也由于单元电路具有体积小、可靠性高、能大量生产和成本低等优点，而混合集成电路则具有电路设计自由度大、无源元件的数值可以有较大的范围和较高的精度、寄生效应较小等优点。

按集成电路所体现的功能来分，可分成数字集成电路，模拟集成电路两大类。数字集成电路是能够完成数字运算的集成电路。它以低电平和高电平两种状态来代表二进制数中的“0”和“1”，通过各种逻辑关系进行运算，所以又称为逻辑集成电路。数字集成电路广

泛地应用于电子计算机、自动控制系统以及数字通信系统中。所谓模拟集成电路是指能对电压、电流等模拟量进行放大与转换的集成电路。其中，输出信号与输入信号成线性关系的电路，如直流放大器、差分放大器、低频放大器、高频放大器、线性功率放大器、运算放大器等称为线性集成电路；输出信号与输入信号不成线性关系的电路，如对数放大器、丙类功率放大器、振荡器、混频器、检波器、调制器等称为非线性集成电路。

近年来，模拟集成电路的工作频率发展到了微波频段，由于微波电路的设计和集成工艺都有它的特殊性，人们将这类电路单独称为微波集成电路。微波集成电路和一般低频集成电路一样，由于制作方法不同，一般可分为单片式和混合式两类。即半导体微波集成电路和混合微波集成电路。前者是在高阻半导体基片上（如高阻硅、砷化镓等）制作有源和无源元件所构成的电路，其体积比混合式的小，但电路的损耗较大、谐振电路的 Q 值低。后者则是在诸如氧化铝陶瓷、蓝宝石或铁氧体等基片上，采用薄膜或厚膜技术制作出无源元件和电路，再把有源器件以适当的方式装配到电路中所构成的电路。平常叫做微带。当前国内外达到实用水平的主要是混合微波集成电路，只是在毫米波段内才有可能采用砷化镓来制作单片微波集成电路。若按电路设计原则来分，每类又可分成集总参数电路和分布参数电路两种。因此，微波集成电路共有四种：单片集总参数电路，单片分布参数电路和混合集总参数电路，混合分布参数电路。微波集成电路所运用的频率范围基本上在300兆赫到100千兆赫。一般在一千兆赫以下以集总参数设计电路较多，在一千兆赫以上的主要用分布参数来设计电路。目前，混合微波集成技术已适合于制作各种微波集成放大器、混频器、振荡器、倍频器、滤波器、移相器、转换开关等各种电路，并正向集成度更高，更复杂的电路发展。

按构成集成电路的有源元件结构来分，可分成双极型和MOS型集成电路两种。双极型电路的有源元件是用普通的NPN或PNP

双极晶体管，管内导电的载流子要流经P型和N型两种极性的材料（故称双极性）；MOS型电路的有源元件采用MOS（金属-氧化物-半导体）晶体管。

集成电路按照规模大小，可以分为小、中规模集成电路（指单片芯片集成度 ≤ 100 门/芯片或 ≤ 1000 晶体管/芯片）；大规模集成电路（指单位芯片集成度 ≥ 100 门/芯片或 ≥ 1000 晶体管/芯片）；超大规模集成电路（集成度高于大规模集成电路100倍，集成度 ≥ 10000 门/芯片或 ≥ 100000 晶体管/芯片）。

一、半导体集成电路

半导体集成电路的技术基础是平面工艺。它是在单个半导体材料的小片（通常称为芯片）上制作出有源元件和无源元件，用金属蒸发工艺制作互连线而构成的电路。这种电路的最大特点是适于大量生产，且可靠性高，因而特别受重视。目前数字集成电路和模拟集成电路的生产都广泛采用平面工艺。

1. 数字集成电路

数字集成电路很容易采用平面工艺制作晶体管、二极管、电阻。故它是集成电路中发展得最早的一种。数字集成电路主要用于计算机和其它数字电路中。由于它是传输低电平与高电平两种状态的电路，故电路元件特性的容许偏差可较大，易于实现集成化，因此，发展快，生产量也大。

数字集成电路目前产品已系列化。按其结构的有源，无源元件组合情况和工作状态，主要可分如下几种：二极管-晶体管逻辑电路(DTL)，晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)，这两种电路中的晶体管在导通时都处于饱和状态，故称为饱和型逻辑电路，优点是抗干扰强、功耗较低，缺点是开关速度较慢。此外还有非饱和型逻辑电路：电流型逻辑电路(CML)，主要为发射极耦合逻辑电路(ECL)，互补晶体管逻辑电路(CTL)；二极管发射极跟随逻辑电路(DEFL)

等。非饱和型电路的特点正好与饱和型电路相反。上述各种电路中，TTL 和 ECL 是当前还大量生产的两种数字集成电路。近年来由于利用肖特基二极管箝位的抗饱和 STTL 的投产，使 TTL 的速度大大提高了。ECL 则以 10 K 系列用得比较普遍，各方面性能较为完善，比 STTL 达到了更高速的领域。根据新的逻辑设计方法，出现了集成度高，功耗低的集成注入逻辑电路 (I^2L)，并提出了许多 I^2L 的改进型式。另外，随着双极型集成电路工艺的飞跃发展，原来的旧逻辑电路，也以大规模集成电路的形式复活了。

2. 模拟集成电路

模拟集成电路主要用于军事通信，导弹雷达，电子计算机，自动控制、仪表等。由于它品种繁多，要求数量不大，制造难度较高，因而比起数字电路来，发展较晚、产量较少，但是，近几年来，随着生产发展的迫切需要和工艺水平的不断提高，使模拟集成电路的品种和数量都有大幅度的增加，电路的性能指标也显著提高，因而它在集成电路中所占的比例愈来愈大。

模拟集成电路中最主要的一种电路是运算放大器，它是一种高增益直流放大器，在外接了一些反馈元件后，可进行数学上的加法、比例、积分、微分等运算。由于半导体集成电路中较容易得到配对性能很好的晶体管，因此集成电路的运算放大器，几乎全是差分输入形式的放大器。在运算放大器的电路形式上，也比较充分地发挥了集成电路的特长。

集成稳压器也是模拟集成电路中很重要的一种。在早期的集成化稳压电源中，由于大功率的输出管集成在一个单片上比较困难，所以电源的输出电流较小，为了获得大电流输出，可把大功率调整管与电源的其它部分同时封装在一个管壳内，构成双片式电路。随着集成工艺水平的不断提高，较新的集成稳压器中已能将大功率调整管集成在同一硅片上，实现了大电流输出的稳压电源。

通信、雷达等方面应用的集成电路，品种很多，如中频放大

器、高频放大器、宽带放大器、变频器、混频器、检波器等。这些应用中，最基本的电路是在差分对管的集电极上外接 LC 选频回路，实现选频放大特性，采用集成差分对管，可使电路的性能得到改善。宽带放大电路通常是电阻负载的放大器，在一个较宽的频率范围内有均匀一致的增益特性。

电视机、收音机是广播事业的重要设备，数量很大，集成化后，对缩小体积、提高性能指标、增加可靠性，简化调试过程都有利，特别是便于大量生产和维修。这些电路也是模拟集成电路中产品数量、品种最多的电路。在其它民用集成电路中，医疗设备中的集成电路日益增多，也成为模拟集成电路的一个方面。

3. MOS 集成电路

MOS 集成电路虽然工作速度比双极型集成电路大约慢一个数量级，但是它与双极型集成电路比较有许多独特的优点。

(1) 制造工艺简单，成品率高；制造工序只为双极型的 $\frac{1}{3}$ 左右，而各种工序的平均难度也小一半左右。工序少，工艺简单，自然成品率也就高。

(2) 集成度高：同一个电路单元 MOS 集成电路所需用的有效面积大约为双极型的 $\frac{1}{5}$ 左右。

(3) 功耗低。

MOS 集成电路虽有许多优点，但在初期，由于存在稳定性和可靠性问题，人们对其实用价值持怀疑态度。近年来，由于其性能取得较大进展，再度受到重视。产量大幅度上升，应用也十分普遍。

MOS 集成电路的研究工作主要集中于解决稳定性，提高可靠性和开关速度，以及降低功耗上。前道工序除了加强净化空气、减少沾污外，还引入了钝化工艺，已基本解决了稳定性问题。可靠性主要是表面问题，为此，出现了取代 MOS 中的氧化物 (O) 的氮

化硅膜或氧化铝膜工艺，在蓝宝石上淀积硅工艺以及采用梁式引线
和面键合工艺。提高开关速度，降低功耗，所花力量最大。目前，
互补型的 MOS 集成电路(简称 CMOS)被认为是实现高速、低功耗
较好的集成电路，已达到 2.5 毫微秒，功耗低于 10 毫瓦的水平。
而硅栅工艺制得的电路是目前被认功耗最低的电路，此外，还采用
离子注入技术以提高开关速度，已有许多产品。

4. 半导体集成电路的发展方向

集成电路研究初期，注意力主要集中在提高集成度上(一个集成
电路所包含的元件数称为集成度)。目前，在 2.8×2.8 平方毫米
的片子上，TTL 的集成度为 40 门/片，在 3.2×3.2 平方毫米的片
上，ECL 的集成度为 30 门/片。集成度已基本解决，随着应用要
求的不断发展，又出现了其它重要因素，如提高开关速度，降低功
耗，增强抗辐射能力，提高稳定性、可靠性等。这些因素现已成为
集成电路的发展方向。

数字电路的开关速度直接影响到计算机的运算速度。在使数字
电路高速化过程中，ECL 电路起了相当的作用。近年来由于锗平
面器件工艺有了突破，在此基础上制成了集成电路，其延迟时间达
到 0.15 毫微秒。

为了防止核爆炸辐射和宇宙射线而提出了抗辐射问题。目前在
集成电路方面采取的抗辐射措施包括：一方面改进电路，如加进限
流电阻以防过大的光电流造成的危害，提高电路的放大能力来补偿
由于放大系数下降可能造成的损失等；另一方面是增加元件的抗辐
射能力，如采用介质隔离代替 PN 结隔离，采用镍铬金属膜代替扩
散电阻，重掺金，改进元件几何结构等。

二、膜集成电路

膜集成电路分为两大类，一是薄膜集成电路，一是厚膜集成电
路。