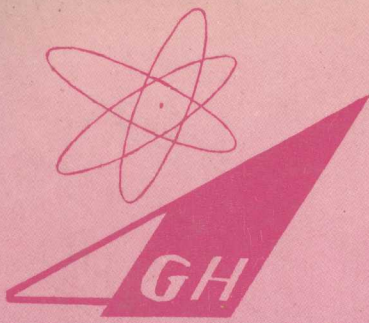
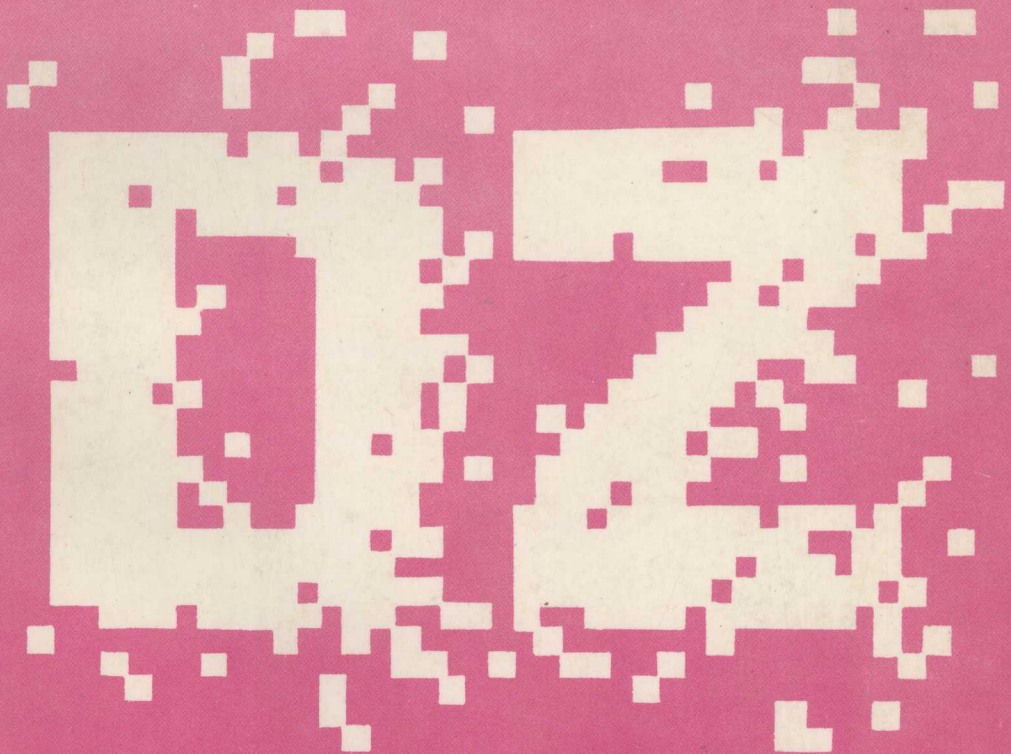




中等专业学校
工科电子类 规划教材

集成电路 原理与应用

洪志刚



东南大学出版社

73.755/103

要 點 容 內

集成电路原理与应用

洪志刚



交 易 群 融 社 責
註 股 伙 收 結 社 責



用 迎 已 照 原 函 申 知 書
網 志 洪



东南大学出版社

ISBN 7-81050-082-5/TN · 10

元 33 : 份 宣

(郵 局 飛 申 承 函 郵 直 下 , 賬 何 書 報 章 中 國 凡)

内 容 提 要

本书分10章叙述集成电路的应用基础、功能分解与框图,集成运放应用技巧、稳压器及应用电路,集成有源滤波器,集成信号调制—解调与频率合成电路,高、中频集成放大电路,集成功放、信号变换电路,集成模拟运算电路,集成信号发生器,集成化典型“系统”分析与集成电路使用等。

本书内容新颖,原理与实用结合。书中所介绍的集成电路大都是目前广泛应用的产品,有一定的实用价值。书中,对集成器件工作原理的讲授是以通过对其内功能框图的分析来实现的;最后部分所介绍的集成器件应用中的工艺基础知识及综合读图方法等,对如何正确使用集成器件及提高对集成化系统综合读图的能力均颇有益。

本书可作为中专无线电技术专业或相近专业的教材,也可供电子类工程技术人员参考。

责任编辑 张 克

责任校对 刘娟娟



集成电路原理与应用

洪志刚

*

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210018)

江苏省新华书店经销 扬州公道印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17.25 字数: 400 千

1995年12月第1版 1996年3月第1次印刷

印数: 1—3000 册

ISBN 7-81050-087-2/TN·10

定价: 23 元

(凡因印装质量问题,可直接向承印厂调换)

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,以“全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的九个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300多种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部电子类专业教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1991~1995 年编审出版规划,由电子工业部中专电子技术专业教学指导委员会组织的审稿会审定通过并推荐出版。责任编辑委为上海电子技术学校吴汉森高级讲师。

本教材由上海无线电元件五厂郝鸿安高级工程师担任主审。

本教材是作者在多年来为电子类专业中专生开设课程教学内容的基础上编写而成。全书共 10 章,可划分为三大块。第一块介绍集成电路的特点及通用集成器件——运算放大器的应用基础与应用技巧;第二块通过对常用电子功能电路的组态剖析并服从于电路功能的实现来介绍集成器件的应用方法;第三块介绍集成块应用中的工艺基础、器件替代与互换的一般原则与方法,为增强对集成化电子系统的读图能力,还通过实例分析介绍读图的一般方法。

本教材的特点:对集成块内部电路不作详细地原理性分析,采用框图分析法来认识集成块的功能和掌握集成块的应用;本教材内容新颖,原理与实用结合。第 1 至第 7 章所述集成电路大都是目前广泛应用的产品,还有些是正在发展扩大应用范围的新产品,它们均是 90 年代军用、民用、工业用的主力器件。

本课程讲授的参考学时为 70 学时,根据实际需要也可选择其中的若干部分进行讲授。本课程应继《模拟电子线路》、《脉冲数字电路》课程之后开设。建议本课程配合一定量的实验和课程设计,学以致用,为深入学习集成电路及其应用打好基础。

本教材从编写大纲到书稿的形成过程中,得到了电子工业部中专电子技术类专业教学指导委员会、电子工业部下属各兄弟学校的电子专业同行的热情指导,并提出了许多中肯的建议和宝贵意见,这里表示诚挚的致谢。

由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1995 年 12 月

目 录

0 绪 论

0.1 半导体集成电路的简要制造工艺	(1)
--------------------------	-----

0.2 集成化元件特性对电路系统的影响	(2)
---------------------------	-----

1 集成电路应用基础

1.1 集成电路的结构特点	(5)
---------------------	-----

1.1.1 集成化元件的结构特点	(5)
------------------------	-----

1.1.2 基本单元电路的结构特征	(7)
-------------------------	-----

1.1.3 差动放大器及其改进电路的工作原理	(7)
------------------------------	-----

1.1.4 双差分电路的应用特性	(10)
------------------------	------

1.2 集成电路的功能分解与功能框图	(16)
--------------------------	------

1.3 集成电路的应用知识	(19)
---------------------	------

1.3.1 集成电路的分类与封装形式	(19)
--------------------------	------

1.3.2 集成电路的命名方法与运放标准化规定	(23)
-------------------------------	------

1.4 集成运算放大器应用技巧	(27)
-----------------------	------

1.4.1 自激与相位补偿	(27)
---------------------	------

1.4.2 零点调节与调零电路	(32)
-----------------------	------

1.4.3 运放应用电路的基本分析方法	(35)
---------------------------	------

1.4.4 通用型运放的性能扩展技术与保护措施	(35)
-------------------------------	------

2 集成稳压器及其应用电路

2.1 运放组合式稳压源	(47)
--------------------	------

2.1.1 运放组合式稳压器的原理与精度分析	(47)
------------------------------	------

2.1.2 运放组合式稳压电路实例	(49)
-------------------------	------

2.2 单片集成稳压器	(51)
-------------------	------

2.2.1 CW723 集成稳压器及应用电路	(52)
------------------------------	------

2.2.2 三端集成稳压器及应用电路	(55)
--------------------------	------

2.3 集成开关调整器及应用电路	(58)
------------------------	------

2.3.1 开关稳压器的一般原理	(58)
------------------------	------

2.3.2 集成开关控制器及其应用举例	(61)
---------------------------	------

3 集成有源滤波器

3.1 滤波器的传递函数与特性	(68)
-----------------------	------

3.2 常用有源滤波电路	(73)
--------------------	------

3.2.1	压控电压源型滤波器	(73)
3.2.2	无限增益多路反馈型滤波器	(75)
3.2.3	双二次型滤波器	(77)
3.3	有源滤波器的快速设计与举例	(78)
3.3.1	设计方法	(78)
3.3.2	举例	(81)
3.4	开关电容滤波器特性与应用简介	(82)
4	集成信号调制—解调与频率合成电路	
4.1	集成信号调制与解调电路	(85)
4.1.1	乘积型调制与解调电路	(85)
4.1.2	PLL 型调制与解调电路	(93)
4.1.3	FSK 调制与解调电路	(100)
4.2	信号的频率合成技术与电路	(103)
4.2.1	双模分频器的工作原理	(105)
4.2.2	集成 PLL 频率合成电路实例	(105)
4.2.3	集成频率合成器	(106)
4.3	立体声复合信号与集成解码电路	(109)
4.3.1	导频制立体声复合信号	(110)
4.3.2	立体声信号的解调原理与方法	(111)
4.3.3	集成 PLL 立体声解码器与应用举例	(117)
5	高、中频集成放大电路	
5.1	调幅中频放大器集成电路	(119)
5.1.1	调幅集成电路的特点	(119)
5.1.2	单片 AM 收音机集成电路应用实例	(122)
5.2	调频中频放大器集成电路	(123)
5.2.1	调频高频头和中频放大器	(123)
5.2.2	TDA70 $\times\times$ 系列调频集成电路的特点及其应用	(126)
5.3	FM/AM 高、中频放大集成电路	(129)
5.3.1	FM/AM 共用中放集成电路与应用	(129)
5.3.2	FM/AM 独立中放集成电路与应用	(132)
5.3.3	FM/AM 全功能单片收音机集成电路与应用	(136)
6	集成功率放大器	
6.1	单片集成功率放大器与应用电路	(140)
6.1.1	集成功率放大器的运用方式	(140)
6.1.2	单片集成功率放大器应用举例	(142)
6.2	集成功率驱动器与应用举例	(148)
6.3	厚膜功率放大器与应用电路	(151)
6.3.1	STK 系列厚膜功率放大器的结构特点	(151)
6.3.2	STK 系列厚膜功率放大器应用举例	(153)

7 集成信号变换电路	156
7.1 集成 V/F 和 F/V 变换电路	156
7.1.1 V/F 和 F/V 变换器的基本结构与原理	156
7.1.2 集成单片 V/F 和 F/V 变换器特性与应用电路	159
7.1.3 其他 V/F 与 F/V 转换电路	163
7.2 集成 D/A 和 A/D 变换电路	166
7.2.1 D/A 变换器的基本结构与原理	166
7.2.2 集成单片 D/A 转换器特性	170
7.2.3 集成 DAC 器件应用举例	173
7.2.4 A/D 变换器的基本结构与原理	175
7.2.5 常用 ADC 器件特性与应用	182
7.3 集成 V/I 和 I/V 变换电路	192
7.3.1 V/I 和 I/V 变换器的基本结构与原理	192
7.3.2 集成 V/I 和 I/V 转换电路实例	195
8 集成模拟运算电路	
8.1 集成对数—反对数运算电路	197
8.1.1 对数—反对数运算电路的基本结构与原理	197
8.1.2 集成对数—反对数运算电路实例	199
8.2 集成模拟乘、除法运算电路	201
8.2.1 乘法运算电路的结构与原理	201
8.2.2 乘除运算的变换方式与原理	204
8.2.3 集成乘除法运算电路实例	204
9 集成信号发生电路	
9.1 信号发生器的基本结构	210
9.2 集成正弦信号发生器	211
9.2.1 RC 正弦波信号发生器的结构与原理	211
9.2.2 集成 RC 正弦波信号发生器	214
9.3 集成函数信号发生器	217
9.3.1 方波信号发生器	217
9.3.2 占空比可变信号发生器	219
9.3.3 三角波和锯齿波信号发生器	220
9.3.4 阶梯波信号发生器	222
9.4 集成单片函数发生器及其应用	224
9.4.1 集成单片 NE566 的结构与特性	224
9.4.2 集成单片 ICL8038 的结构与特性	225
9.4.3 集成单片函数发生器应用实例	228
10 集成化典型“系统”分析与集成电路使用常识	
10.1 集成化“系统”的分析方法	230
10.1.1 “系统”分析的一般方法	230

0 绪 论

在电子技术发展的进程中,任何一种新产品的出现,无不伴随技术上的跃进。美国德克萨斯公司于 1959 年首次研制成功的集成电路,使整个电子工业产生了划时代的变化。

集成电路,就是采用半导体工艺或薄、厚膜工艺,将组成电路的有源元件(晶体管、二极管)、无源元件(电阻、电容)以及它们之间的有关连线等,一起制作在一块半导体或绝缘基片上,构成结构紧密联系的整体电路。

最早的集成电路内部仅有几个或者十几个元件,到 60 年代中期才出现小规模集成电路(SIC),其集成度在 100 个元件以下;70 年代初期出现了中规模集成电路(MIC),集成元件为 100~999 个;大规模集成电路(LIC)问世于 70 年代中期,集成化元件在 1000 个以上;到了 80 年代开始生产出集成度大于 10000 个元件的超大规模集成电路(VLIC);1984 年,在美国旧金山国际固体电路学会上,日本有线电信电话会社、日立制作所和日本电气(NEC)公司三家同时宣布试制成功 100 万位的超大规模集成电路。也就是说,象人民日报 8 个版面的全部文字可以原封不动地一次存储进去。预计 10 年内,在绿豆粒大小的硅片(芯片)上就可以做上 10 亿个单元电路。

集成电路按结构和工艺的不同,可分为半导体集成电路,薄膜、厚膜集成电路及混合集成电路三种。这三种集成电路中,半导体集成电路占绝大部分。它是利用平面工艺,在一块半导体单晶上制成品体管及阻容元件,并用特殊的结构使它们在电性能上相互隔离,然后再相互连接起来,构成一个完整的电路。

0.1 半导体集成电路的简要制造工艺

半导体集成电路的制造工艺和平面晶体管的制造工艺是基本相同的。其主要制造工艺有五种:氧化、光刻、扩散、外延、蒸发等。现简单介绍如下:

氧化——是硅片在高温下与水气(或氧气)反应,使之在硅表面上生成一层 SiO_2 。此氧化层有三个作用:(1)可以掩蔽杂质扩散,即杂质在表面有氧化层的地方被挡住了,不能扩散到硅片中去;(2)二氧化硅是很好的绝缘体,它象玻璃板一样,可以在上面进行布线;(3)二氧化硅层可以保护 PN 结,使器件稳定性好。

光刻——是在氧化之后进行的,是为进行选择扩散而在硅氧化膜上开出相应窗口。光刻过程与复印照片的过程相似,即先将光刻胶涂在经过氧化的硅片上,然后按照事先做好的集成电路图形的底片(称为掩膜)放在上面后曝光。曝光后进行显影,把没有曝光的胶溶解掉,已曝光的胶留下形成一层保护膜,最后没有保护膜的二氧化硅用氢氟酸蚀掉而形成

窗孔,再把光刻胶全部去除。

扩散——是将已经光刻好的硅片,置于有杂质的高温气氛下,杂质就可以通过分子运动的形式进入光刻掉氧化层的硅晶体内,从而完成选择性的掺杂工艺。

硅外延生长——是利用气相反应将原子聚集到(P型)硅衬底上,从而在衬底上生长一层具有同衬底相同晶体结构的(N型)硅单晶层。一般是将四氯化硅置于高温下进行氧化还原,或使硅烷(SiH_4)热分解,以生长外延层。

蒸发——是在真空条件下,将金属铝或金等加热,使金属升华为金属蒸气,淀积在硅片的表面。在硅表面作为布线的铝,就是用蒸发的方法淀积到硅表面,然后进行光刻,以实现电路布线的。

图 0.1(见下页)画出了集成电路的典型工艺流程。它们分别是晶体管、二极管和电阻的制造过程。可以看到,二极管和电阻是在制造晶体管的同时制成的。而且,氧化——光刻——扩散是反复多次的工艺过程。在上述工序完成后进行测试和封装,封装形式有圆形管壳封装、扁平封装和双列直插式封装等形式。

0.2 集成化元件特性对电路系统的影响

利用集成电路组装的电子整机产品是直观地反映集成电路质量的标志。特别是它们与分立元件电路相比有许多优点,而且随着制造工艺的不断跃进和提高,特别是集成度的提高,必将越来越显示出它的优越性,其中最主要的特点如下:

1) 电路越趋合理,质量越来越高

同样功能的电路,在集成电路设计时,由于其制作晶体管比较容易,又因为不致于多作晶体管而增加产品成本,这就允许采用较多的元器件尽量把电路设计得更完善。另外,集成电路中的元器件的一致性较好,而且很容易实现性能上的匹配,甚至目前经过严格工艺筛选的元器件也达不到这样的水平,这就促使了很多集成电路组装的整机产品可以免除调整或很少调整,其失调性能很好,同时它的温度特性也大为提高。集成电路内部元器件密集分布,这就造成其布线非常短,提高了其高速、高频性能。这是由于在通常情况下,元器件的面积越大,其寄生电容也就越大,这是产生电阻、电容截止特性的原因,布线长时寄生参数大,和波长相比便是不能忽视的。在集成电路中,这些因素都被大大地减少了。

在集成电路制造过程中,特别是当必要的时候,可以很容易形成稳压电路、温度补偿电路和恒流源等辅助电路,这样可有效地提高电源变动特性和温度稳定特性,并改进和纠正增益的偏差。

2) 有利于降低成本,提高生产效率

采用集成电路后,使得整机外围元器件大大减小、机芯减小、整机结构简化,可以大量降低生产工时、简化调试,有利于组织大规模大批量生产、降低成本、提高劳动生产率。

从经济方面看,特别是消费类民用产品,大量使用集成电路肯定是有好处的。其主要表现有两个方面:一是单纯地从元器件成本进行比较,集成电路的应用,使整机电路更加简单、元器件数量减少,成本降低;二是用集成电路使元器件数量减少,功耗明显下降,使用成本大幅度下降。

据统计,使用集成电路后的整机产品,维修费用或工厂装配、调试以及工位费用减少。

3) 减少元器件数,提高可靠性

电子整机设备,由于电路日益复杂造成了元器件数量不断增加,从而引起可靠性下降,已引起人们的普遍关注。据统计,元器件数量在 10^3 以上的复杂产品,特别难以确保其可靠性。因此,从集成电路诞生之日起,人们就寄望于它能提高可靠性。

在对收音机、录音机、电视机等民用电子产品的损坏进行调查后发现:由于制造工艺使用不当造成的故障占总故障率的40%;由于插接不良而造成的故障率为20%;而焊接不良造成故障率为30%~40%。排除此故障的潜在因素,便是提高可靠性的重要标志。

集成电路内部的连线都是由蒸发铝实现的,人为因素极少,而且其连接部位都是封装在管壳内,不暴露在大气中,这些都是提高可靠性的重要因素。

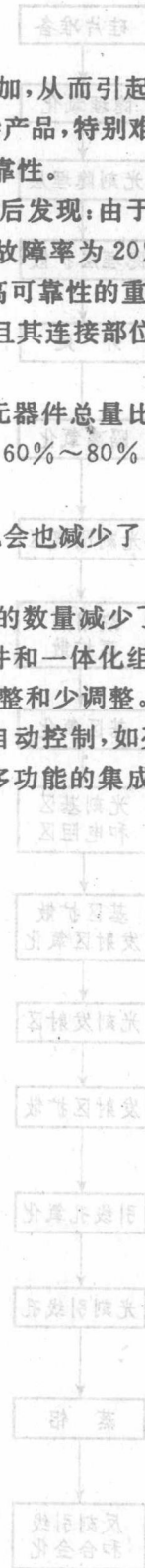
由于集成电路的应用,使相同功能或更多功能的电子产品的元器件总量比分立元件电路少得多。特别是大规模集成电路的出现,使元器件总量降低了60%~80%,这样使焊接点和连接线也显著减少。

元器件数量减少,不但可以省时、省料,而且组装时错误操作机会也减少了。

4) 减少调整步骤,增加使用功能

以音响电子设备为例,电路集成化的结果,据统计可调元器件的数量减少了30%,音响集成电路整机设计中,又常常采用了与之相配合的集中固体组件和一体化组件代替了传统的LC调谐回路,所以很多音响和电视设备都实现了整机无调整和少调整。

集成电路随着集成化的不断提高,功能也在不断扩展。很多自动控制,如亮度、对比度、音量以及选台、频率微调 and 遥控等专用集成电路都已面市,更多功能的集成电路正在拭目以待。



1 集成电路应用基础

集成电路应用技术是一门复杂的科学技术,只有循序渐进地学会必要的基本知识,随着实践再进一步深入,才能全面掌握集成电路的原理及其应用。

本章将介绍集成电路的分类、封装形式和命名,集成电路的结构特点,如何识读集成电路的内功能方框图;运算放大器应用的一些实际问题等。

1.1 集成电路的结构特点

目前所生产的各种集成电路,大都是利用分立元器件的组合形式,演变而来的。如音响、电视系统中的模拟电路绝大部分采用这种形式,尽管其电路要复杂一些,但是基本的工作原理几乎是完全相同的。而另一些电路,如数字化集成电路,用普通分立元器件电路的观点来看则往往是难以理解的。

但是,集成电路总可以分割成很多基本单元电路,并且绝大部分也还是渊源于分立元器件电路,这种有相同,而又有不同,便决定了它的自身特点。

数字集成电路与模拟集成电路相比,单元电路种类单一,功能简单,电参数指标(如失真系数、噪声特性等)都比模拟电路低得多,因而电路结构相对亦简单。况且,任何复杂的数字集成电路也都可以用逻辑与非门或逻辑或非门来组成。TTL 类多数由逻辑与非门构成;ECL 类多由逻辑或非门构成;对 CMOS 来说两种门结构对称,性能相似,因而都使用。只要熟悉逻辑分析方法,对于识读数字集成电路,判断其功能是较为方便的。

模拟集成电路,电路种类五花八门,人们又往往着眼于如何在多功能条件下保证高性能。譬如,一块最简单的单片收音机电路,必须具有变频、中放、检波、AGC、低放、功放和稳压电路,从高频电路到低频电路,从线性电路至非线性电路样样俱全。功能多就导致电路复杂,集成度相应高,且高、低频电路的电参数质量指标又不一样。如高频电路中有消除寄生振荡问题,音频电路中要扩大动态范围问题,提高工作电压问题,功放电路中有耗散功率、非线性失真问题等。另外,还要求线性、信噪比、频率特性等各项指标至少不能低于分立电路。因此,模拟集成电路结构采用了与一般分立元件电路不同的有特色的电路形式。相应地,识读模拟集成电路的电原理图难度亦大。因此,理解集成电路的应用特点,了解集成化元件的结构特点和单元电路的特征是很有必要的。

1.1.1 集成化元件的结构特点

由于集成电路的生产工艺要求元器件的集成度及性能不断提高,因此元器件在结构上必须各有特点。下面对此作些简单的介绍。

1) 晶体三极管

在制造过程中,广泛采用 NPN 和 PNP 型组合结构。NPN 型管属于纵向结构,它的

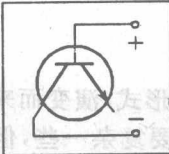
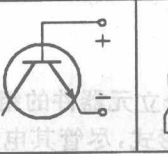
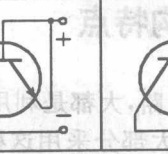
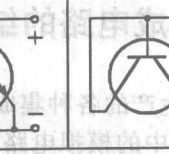
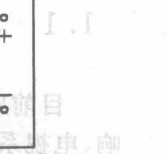
频率特性较好,电流放大倍数 h_{fe} 较高;PNP 型管一般为横向结构,由于基区宽度受到限制, h_{fe} 一般只能做到 0.2~5,且 f_T 也较低(2~5MHz)。所以,两者结合使用,就可以取长补短了。

此外,由于集成电路工艺能容易地制成晶体管,所以在电路应用中也出现了一些新的特点:如,用晶体管的恒流源特性代替电阻,并以此为恒流源或有源动态负载;由于集成电路中的所有晶体管都采用同一工艺流程,其电参数和温度变化特性都有较好的一致性,即相邻元件参数比值的误差却很少。

2) 晶体二极管

集成电路中使用的二极管在结构上与三极管完全相同,但它往往根据用途的不同,将相当于三极管的发射极—基极结或集电极—基极结组合而成。组合成的二极管特性见表 1.1 所示。

表 1.1 各种连接法的二极管特性

					
击穿电压(V)	7	7	50	7	50
正向电压(V)	0.85	0.92	0.94	0.96	0.95
并联电容(pF)	0.5	1.2	0.7	0.5	0.7
存储时间(ns)	9	100	53	56	85
特点	存储时间短 无寄生效应	存储时间长	反向电压高	寄生电压小	反向电压高

3) 电阻器

集成电路中的电阻是在制作晶体管的同时做成的,它既可以是 P 型硅,也可以是 N 型硅,但一般常用基区扩散电阻,通常在 $50\Omega\sim 10k\Omega$ 之间,而沟道电阻 R_c (方块电阻值)可以高达 $10\sim 20k\Omega/\square$ 。

集成电路中电阻器参数的规定范围大致为:额定功率 $P=200mW$,阻值 $20\Omega\sim 20k\Omega$,容许误差 $\pm 10\%\sim \pm 30\%$ 。

4) 电容器

集成电路的电容器有三种:

(1) PN 结电容器:电容量最高也只能做到 $1500pF$,而一般情况下仅为数十 pF 。它还有一个致命缺点,即电容量随电压而变化,且有极性。另外,由于扩散层的串联电阻,使得它的 Q 值较低。

(2) MOS 电容器:它的制造需要采用比较麻烦的专门工艺,且电容量也有限,所以使用较少。

(3) 氧化硅薄膜电容:它是利用集成电路制造过程中所形成的 SiO_2 保护层的部分氧化硅作介质的电容器,这种电容虽然没有对电压的依存性和极性变化,但容量也不能做得太大。因为制作容量较大的电容占用硅片面积大,不利于提高集成度。

由上述原因可知,集成电路中应尽可能避免采用大容量电容。需要特别大的电容量

时,可用外接电容的办法解决。

集成电路的工艺特点决定了各元件参数的精度比较低,即绝对误差很大,但由于同一硅片上相邻元件制造时工艺条件均相同,因此相邻元件的参数要么都偏大,要么都偏小,即相邻元件参数的比值的误差都很小。表 1.2 列出了晶体管参数和扩散电阻的绝对误差及同一硅片相邻元件参数比值的相对误差值。表中还列出了温度系数的绝对值及相邻元件的相对温度系数。元件参数的温度系数较大,但相邻元件的相对温度系数却很小,即相邻元件参数的温度跟随特性好,温度升高时,元件参数同时增加或减少,但比值变化很小。

表 1.2 集成电路元件参数的误差

元件参数名称	典型值	绝对误差 (%)	参数比值 相对误差	温度系数 ($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$	相邻元件相对 温度系数($^{\circ}\text{C}$) $^{-1}$
晶体管电流 放大系数 β	20~100	+50~-30	$\pm 10\%$	+0.5%	
晶体管发射结 正向压降 U_{BE}	0.7V	± 3	$\pm 2\text{mV}$	-2mV	+10 μV
扩散电阻 R	50 Ω ~20k Ω	± 20	$\pm 3\%$	+0.15%	$\pm 0.005\%$

1.1.2 基本单元电路的结构特征

半导体集成电路的主要制作方法是平面工艺,这种工艺擅长制作晶体管和扩散电阻。可以讲,集成电路芯片是一个晶体管堆栈,能够很方便地制作有源器件与电路。它的另一个特点是,在同一硅片的相邻位置上制作元件的一致性很好,或者讲是有良好的匹配特性。所以集成电路中很容易采用直接耦合的方式制作差分放大器。差分放大器对元件参数的绝对误差要求低,但对电路两边元件参数的对称性要求高,即对元件参数的相对误差要求高。另外,差分放大器又是一种多功能电路,特别适宜作为模拟集成电路中最普遍、最基本的信号处理电路。

集成电路的制造工艺,决定了构成其内电路的独具特色的形式,这些基本单元电路是:采用多种形式的镜像恒流源电路,例如用恒流源作放大器偏置电路,用恒流源作负载等;采用多种基准电压源形式和具有温度补偿的内部稳压电路;采用多种形式的直流电平偏移电路,用以限制因多级耦合放大引起的直流电平的升降;大量使用差分放大器和双差分放大器;采用模拟乘法器实现许多非线性变换,如检波、鉴频、鉴相和同步解调等;采用多种形式的增益控制电路,如利用改变电流分配比来改变增益(分流式 AGC),即利用改变差分放大器工作电流来改变增益,利用改变差分放大器射极负反馈电阻来改变增益(负反馈控制增益称减生 AGC);采用复合结构形式共射一共基电路、共集一共基电路、互补等电路形式。

这种电路形式,如恒流源电路、直流电平偏移电路等,已在《电子线路》课程中作了介绍,这里不再作过多重复。这里重点介绍差动放大器及其应用特性。

1.1.3 差动放大器及其改进电路的工作原理

差分电路是线性集成电路的基础,也是最早被集成化的模拟集成电路。图 1.1 所示为差分放大基本电路。如果 T_1 、 T_2 两管完全对称,那么,当输入 $V_{id}=0\text{V}$ 时, $I_{e1}=I_{e2}=I_o/2$ 。

晶体管的电流特性可表示为

$$I_C = \alpha I_E = \alpha I_S \left[\exp \frac{qV_{BE}}{K \cdot T} - 1 \right]$$

式中,射极反向饱和电流 I_S 相对来说很小,故常可近似为

$$I_C = \alpha I_S \exp \frac{qV_{BE}}{K \cdot T}$$

根据 $V_{id} = V_{BE1} - V_{BE2}$, $I_{e1} + I_{e2} = I_o$ 及 $I_C = \alpha I_S \exp \frac{qV_{BE}}{K \cdot T}$, 可得

$$I_C = \frac{\alpha I_o}{1 + \exp(V_{id}/V_T)}$$

式中 $V_T = \frac{K \cdot T}{q}$, 在 28°C (即 301K) 时, $V_T \approx 26\text{mV}$ 。因此,差分对的跨导为

$$g_m = \frac{\partial I_o}{\partial V_{id}} = \frac{\alpha I_o \exp V_{id}/V_T}{V_T (1 + \exp V_{id}/V_T)^2}$$

当工作在 $V_{id} = 0\text{V}$ 时,跨导变为 $g_{mo} = \frac{\alpha}{4V_T} I_o$, 电路的输出为 $V_{od} = \frac{\alpha}{4V_T} I_o (R_{c1} + R_{c2}) V_{id}$ 。

可见,差分电路若用 V_B 电压控制 I_o , 则输出就是 $V_{od} = K' V_B V_{id}$ 乘法形式,即变跨导 (g_m) 式乘法形式,但由于其存在如下的一些缺点而不实用: (1) 直接加 V_B 控制 I_o 时,二者成非线性关系; (2) $\frac{\alpha}{4V_T} I_o$ 项反比于温度 T , 因而特性不良; (3) V_{id} 输入可正、可负,但 V_B 只能是正值。

若电路采用两组差分对,以反极性方式相连接,而且两组差分对的恒流源 T_5 和 T_6 又组成一对差分电路。那么,恒流源的控制电压可正、可负,以此实现四象限工作。并且因发射极加了电阻 R_x , 就可使 V_{id} 值比 $K \cdot T/q$ 值大得多,这样既可减小温度 T 的影响,又改善了线性,同时还扩大了 V_{id} 输入电压的范围。模拟乘法器 1496/1596 电路的核心部分就是采用这种结构,如图 1.2 所示。

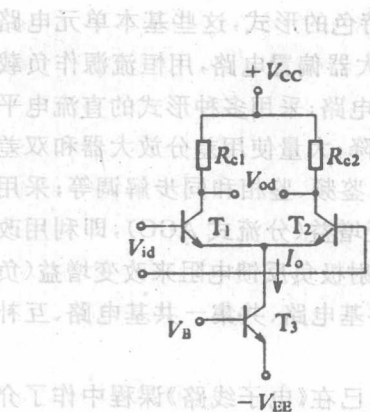


图 1.1 平衡差分放大器基本电路

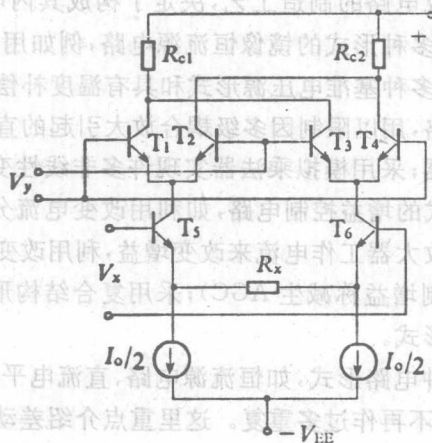


图 1.2 平衡双差分放大器基本电路

这种双差分电路结构虽然解决了工作象限问题,减少了温度 T 的影响及改善了 V_{id} 的线性等,但用作模拟运算使用还有不足之处:首先是 V_{id} 的输入动态及线性范围均很