



21世纪高等院校电子信息  
与电气学科系列规划教材

# 模拟集成电路

宋焕明 赵俊霞 周志祥 编



机械工业出版社  
China Machine Press



21世纪高等院校电子信息  
与电气学科系列规划教材

本书是“21世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”之一，由机械工业出版社出版。本书共分8章，主要介绍模拟集成电路的组成、工作原理、应用及测试方法。本书可作为高等院校电子信息与电气类专业及相关专业的教材，也可供从事该工作的工程技术人员参考。

# 模拟集成电路

宋焕明 赵俊霞 周志祥 编



机械工业出版社  
China Machine Press



随着信息技术的迅猛发展,培养“适应 21 世纪时代需求的、有创新能力的复合型人才”已成为当前高等院校教育工作的重点。新型的人才培养模式应以基础扎实,拓宽专业口径为着眼点,突出培养学生的科学研究能力和工程设计能力。“编写精品教材,创建精品课程”是实现新型培养模式的基本保证。为进一步配合全国高校提高教育教学质量,共享优质教学资源,推动电子电气类精品课程的建设工作,机械工业出版社华章分社将与教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、教学名师和知名教授一起建设“高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”,从高校的教学改革出发,在对电子电气类课程的课程体系和教学内容深入研讨的基础上,建设具有先进性、创新性、实用性的精品教材和教学资源体系,使该系列教材成为“立足专业规范,面向新需求,成就高质量”的精品。

该系列教材的出版以新的教改精神和人才培养模式作为指导,这样不仅能够保证教材质量,而且有利于促进学科的发展。根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求、学科发展和人才培养的目标”,确定教材特色如下:

- 教材的编写要以教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求”为依据,以培养满足国家和社会需要的高素质人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材结构体系具有渐进性,体现教学规律和学生的认识规律,使教材的结构完整,内容具有系统性、科学性和准确性,理论阐述严谨、正确。
- 教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,充分体现新知识、新技术、新工艺、新成果;既要加强基础理论,也要强化实践内容;理论的阐述、实验内容和习题的选取都应紧密联系实际,使学生做到运用理论处理实际问题,培养学生分析问题和解决问题的能力。

为做好该系列教材的出版工作,我们聘请了东南大学王志功教授为编审委员会顾问,天津大学孙雨耕教授为编审委员会主任,以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、电子科技大学、华中科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、吉林大学等国内重点大学的教授为编审委员会副主任委员和委员,从根本上保证了教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议,逐步改进和完善该系列教材,积极推动高等院校教学改革和教材建设。

# “21世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”

## 编审委员会

编审委员会 顾问：王志功(东南大学)

编审委员会主任：孙雨耕(天津大学)

编审委员会副主任：倪光正(浙江大学)

彭启琮(电子科技大学)

张晓林(北京航空航天大学)

戴先中(东南大学)

编审委员会委员：

陈洪亮(上海交通大学)

陆文娟(清华大学)

马西奎(西安交通大学)

吴建强(哈尔滨工业大学)

华成英(清华大学)

孟 桥(东南大学)

刘新元(北京大学)

蔺志青(北京邮电大学)

姜建国(上海交通大学)

石光明(西安电子科技大学)

尹项根(华中科技大学)

黄瑞光(华中科技大学)

邓建国(西安交通大学)

郭树旭(吉林大学)

王成华(南京航空航天大学)

陈鹤鸣(南京邮电大学)

李哲英(北京联合大学)

王泽忠(华北电力大学)

清华大学出版社

为适应我国当前高等教育的蓬勃发展和人才培养的需要,针对高等院校工科电子科学与技术专业本科生的知识结构,三江学院电子信息工程学院与机械工业出版社联合编写了模拟集成电路课程的教材。其先修课程包括电路分析、模拟电路和数字电路,是后续必备的一门先行专业课程,同时为学生今后研究和开发模拟集成电路打下基础。

考虑到学生的理论基础、自学能力和科技人才的培养要求,在内容覆盖面较广的基础上,力求做到深入浅出、内容充实、简明扼要,并注重理论联系实际、把理论落到实处。

第1章重点介绍模拟集成电路中元器件的结构、特点和制造工艺,是以后各章的基础。第2~9章分别讲解8种通用模拟集成电路,基本思路是电路基础理论、特性、结构、用途和发展;单元电路分析、整体电路分析、设计思想、实际产品介绍和应用电路分析。

本教材安排讲课48个学时,3个学分。由于8种通用模拟集成电路的独立性很强,因此讲课前后章节的次序和讲述的内容可根据学生的具体情况作适当的选择和变动。

每章都附有习题,以帮助学生掌握知识要点。

本书主要由三江学院宋焕明教授编写,经赵俊霞、周志祥修改并补充完整,张安康教授为本书的编写给予了热情指导和帮助。在教材编印过程中,徐贤、刘红军和三江学院B04092班的同学协助绘制了书中的部分插图。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中错误和不当之处在所难免,恳请读者指正。

1	2-1	<p>本书主要介绍模拟集成电路中元器件的结构、特点和制造工艺,是以后各章的基础。第2~9章分别讲解8种通用模拟集成电路,基本思路是电路基础理论、特性、结构、用途和发展;单元电路分析、整体电路分析、设计思想、实际产品介绍和应用电路分析。</p>	<p>编 者 2009年5月</p>
2	2-2	<p>第1章重点介绍模拟集成电路中元器件的结构、特点和制造工艺,是以后各章的基础。第2~9章分别讲解8种通用模拟集成电路,基本思路是电路基础理论、特性、结构、用途和发展;单元电路分析、整体电路分析、设计思想、实际产品介绍和应用电路分析。</p>	<p>第1章 模拟集成电路</p>
3	3-1	<p>第2章重点介绍集成运放的结构、特点和制造工艺,是以后各章的基础。第3~9章分别讲解7种通用模拟集成电路,基本思路是电路基础理论、特性、结构、用途和发展;单元电路分析、整体电路分析、设计思想、实际产品介绍和应用电路分析。</p>	<p>第2章 集成运放</p>
4	3-2	<p>第3章重点介绍集成比较器的结构、特点和制造工艺,是以后各章的基础。第4~9章分别讲解6种通用模拟集成电路,基本思路是电路基础理论、特性、结构、用途和发展;单元电路分析、整体电路分析、设计思想、实际产品介绍和应用电路分析。</p>	<p>第3章 集成比较器</p>

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
第1章 绪论	让学生了解模拟集成电路的发展和特点;了解模拟集成电路元器件的特点和结构, MOS 集成电路的特点;介绍双极型和 MOS 集成电路的制造工艺。	4~6	2
第2章 集成运算放大器	掌握集成运放的结构、特点和设计思想;理解差分输入的重要性及常用的几种电路;了解 CMOS 运放的特点和发展,以及频率补偿原理。 重点:集成运算的整体结构和多级的原理分析,第四代运放的特点。	8~10	7
第3章 集成振荡电路	掌握几种双极型集成多谐振荡器的原理和实际电路;理解 CMOS 集成振荡电路的特点和基本电路。 重点:恒流源对电容充放电的振荡电路的原理、波形和调频方法。	3~5	3
第4章 集成稳压器	掌握集成稳压器的参数和几种常用电路单元的原理、计算;理解 7800 系列、117 系列稳压电路的结构、原理、设计思想;了解开关稳压电路的原理。 重点:单元电路计算,集成稳压器电路分析,开关稳压电路;多种典型电路单元的分析计算,7800、117 系列电路原理和应用电路。	6	4
第5章 集成模拟乘法器	掌握模拟集成乘法器的原理、设计思路;理解模拟乘法器的应用电路。 重点:四象限模拟乘法器线性范围的扩展,乘法器在信号处理中的应用。	3~5	3
第6章 集成锁相环路	掌握 PLL 的结构,各部分电路的作用、工作原理,环路滤波器的计算;理解 L562 的电路原理,调整方法及 PLL 的应用。 重点:3 个主要单元的分析,计算和锁相环的应用;鉴相器的分析和 L562 的电路结构分析。	3~5	3
第7章 数模转换器	掌握权电阻、权电容、T 型、倒 T 型 D/A 转换器的工作原理和分析计算;理解集成 D/A 转换器的结构原理和 3 种应用电路实例。 重点:权电阻、倒 T 型 D/A 转换电路,权电容 D/A 转换器,5G7520 的 3 种应用电路。	5~7	4
第8章 模数转换器	掌握量化与编码方法,计数式、逐次逼近式、并行比较式和双积分式 A/D 转换器的工作原理;了解集成 A/D 转换器 ADC0809、5G14433 的结构、原理和应用电路。 重点:逐次逼近式、并行比较式和双积分式 A/D 转换器,双积分式实际电路分析。	5~7	4

(续)

教 学 内 容	学 习 要 点 及 教 学 要 求	课 时 安 排	
		全 部 讲 授	部 分 选 讲
第 9 章 开 关 电 容 电 路	理解用开关电容等效电阻的原理和意义；了解开关电容滤波器、积分器、A/D 转换器等电路原理。 重点：开关电容单元电路和应用电路。	3 ~ 5	3
教学总学时建议		44 ~ 52	33

说明：1. 本教材为电子信息与电气学科本科专业“模拟集成电路设计”课程教材，理论授课学时数为 44 ~ 52 学时（相关配套实验另行单独安排），不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数可酌情对教材内容进行适当取舍。例如，电子科学与技术、微电子学等专业，教材内容原则上可全讲；电子信息工程、通信工程、自动控制等其他专业，可酌情对教材内容进行适当删减。

2. 本教材理论授课学时数 44 ~ 52 学时，其中包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节。

3. 若某些电子信息与电气学科本科专业教学计划课时少于 44 学时，可部分或全部舍去各章节中的相关电路设计内容。



(续)

设计标准		国家标准及行业标准	参考文献
标准名称	标准编号	参考文献名称	参考文献

# 符号说明

# SIGN DECLARATION

本标准按照GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求编写。本标准与GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求一致。本标准与GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求一致。本标准与GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求一致。

- 小写字母、小写下标，表示交流电压(电流)瞬时值。例如：
  - $i_o$  输出电流瞬时值
  - $v_e$  三极管发射极交流电压瞬时值
- 大写字母、大写下标，表示直流量。例如：
  - $I_o$  输出直流电流
  - $V_B$  基极直流偏置电压
- 小写字母、大写下标，表示包含直流的电压(电流)的瞬时值。例如：
  - $i_o$  含有直流的输出电流瞬时值
  - $u_B$  含有直流的基极电压瞬时值
- 大写字母、小写下标，表示正弦电压(电流)有效值。例如：
  - $I_m$  正弦电流振幅
  - $V_o$  输出正弦电压有效值
  - $V_{CC}$  表示接入电路的电压
  - $V_{DD}$  表示器件内部的工作电压
  - $V_{SS}$  表示电路公共接地端电压

# CONTENTS

# 目 录

出版说明	1	2.3.4 微电流源	17
前言	1	2.3.5 多路电流源	18
教学建议	1	2.3.6 MOS管电流源	18
符号说明	1	电路	18
<b>第1章 绪论</b>	<b>1</b>	2.4 差分放大电路	19
1.1 模拟集成电路的发展	1	2.5 几种差分输入电路	23
1.2 模拟集成电路的特点	3	2.5.1 复合管差分放大	23
1.3 模拟集成电路中的元器件	3	电路	23
1.3.1 NPN型晶体管	3	2.5.2 共集—共基组合差	24
1.3.2 超 $\beta$ 晶体管	4	分输入级电路	24
1.3.3 PNP型晶体管	4	2.5.3 超 $\beta$ 管共发射极—	25
1.3.4 二极管	5	共基极组合差分	25
1.3.5 场效应管	6	输入极电路	25
1.3.6 电阻	6	2.6 直流电平位移电路	25
1.3.7 电容	7	2.7 输出级和输出级保护电路	26
1.4 MOS集成电路	7	2.8 F007集成运算放大器电路	28
1.5 模拟集成电路制造工艺简介	8	分析	28
练习一	10	2.8.1 F007静态工作点	28
计算	28	2.8.2 F007差模输入电阻	30
和差模增益	30	2.9 CMOS运算放大器	30
<b>第2章 集成运算放大器</b>	<b>12</b>	2.9.1 单级CMOS	31
2.1 引言	12	放大器	31
2.2 集成运算放大器的结构和主要	12	2.9.2 CMOS运算放大器	32
技术参数	12	5G14573	32
2.2.1 集成运算放大器	12	2.9.3 CMOS运算放大器	34
的结构	12	5G7650	34
2.2.2 集成运算放大器	13	2.10 运算放大器的频率特性和	36
的主要技术参数	13	稳定工作的分析	36
2.3 镜像电流源偏置电路	15	2.10.1 单极点放大器的	36
2.3.1 基本镜像电流源	15	开环频率特性	36
2.3.2 改进型镜像	15		
电流源	15		
2.3.3 比例电流源	16		

2.10.2	多极点放大器的 频率特性	37	4.4	集成开关稳压器	71
2.10.3	运算放大器稳定 工作的条件	38	4.4.1	CW1524 的电路 组成和工作原理	71
2.10.4	简单电容补偿	38	4.4.2	CW3524 开关稳 压器	73
2.10.5	密勒电容补偿	39	练习四		73
2.11	MOS 运算放大器的设计	40	<b>第 5 章 集成模拟乘法器</b>		<b>75</b>
练习二		41	5.1	模拟乘法器的基本概念和 主要技术参数	75
<b>第 3 章 集成振荡电路</b>		<b>43</b>	5.1.1	基本概念	75
3.1	概述	43	5.1.2	主要技术参数	76
3.2	RC 多谐振荡器	43	5.2	变跨导模拟乘法器	77
3.2.1	基本电路和工作 原理	43	5.2.1	二象限变跨导 乘法器	77
3.2.2	单比较器型 RC 多谐振荡器	45	5.2.2	双平衡乘法器	77
3.2.3	双比较器型 RC 多谐振荡器	46	5.3	双平衡乘法器的改进	79
3.3	恒流充放电振荡器	47	5.3.1	采用发射极电阻	79
3.4	射极耦合多谐振荡器	49	5.3.2	采用补偿电路	80
3.5	CMOS 多谐振荡器	51	5.4	BG314 型模拟乘法器	81
练习三		54	5.4.1	BG314 外接元件 的计算	83
<b>第 4 章 集成稳压器</b>		<b>55</b>	5.4.2	BG314 的调整	84
4.1	概述	55	5.5	集成模拟乘法器应用举例	85
4.1.1	集成稳压器的 主要参数	55	5.5.1	模拟运算	85
4.1.2	集成稳压器中的 单元电路	56	5.5.2	信号处理	86
4.2	集成稳压器典型电路分析	61	练习五		89
4.2.1	集成三端稳压器 SW7800	61	<b>第 6 章 集成锁相环路</b>		<b>90</b>
4.2.2	三端可调式正压 稳压器 CW117	63	6.1	锁相环的组成和工作原理	90
4.2.3	三端稳压器的 功能扩展电路	66	6.2	模拟集成锁相环的 单元电路	92
4.3	开关稳压电源	67	6.2.1	鉴相器	92
4.3.1	开关稳压电源的 特点	67	6.2.2	环路滤波器	94
4.3.2	开关稳压电源的 基本工作原理	68	6.2.3	压控振荡器	97
			6.3	单片集成锁相环 L562	98
			6.3.1	L562 的电路结构 和工作原理	98
			6.3.2	L562 的电路连接和 VCO 频率调整	101

6.4	集成锁相环应用举例	102	8.2.2	逐次逼近式 A/D 转换器	120
6.4.1	频率调制	102	8.2.3	并行比较式 A/D 转换器	121
6.4.2	调频波解调	102	8.3	间接转换型 A/D 转换器	123
6.4.3	频率合成器	103	8.3.1	双积分式 A/D 转换器	123
练习六		105	8.3.2	V-F 型 A/D 转换器	124
<b>第 7 章</b>	<b>数模转换器</b>	<b>106</b>	8.4	集成 A/D 转换器	125
7.1	权电阻 D/A 转换器	106	8.4.1	A/D 转换器的 技术指标	125
7.2	R-2R T 型网络 D/A 转换器	107	8.4.2	八位 A/D 转换器 ADC0809	126
7.3	倒 T 型网络 D/A 转换器	108	8.4.3	A/D 转换器 5G14433	127
7.4	权电容 D/A 转换器	109	练习八		132
7.5	D/A 转换器中的模拟 开关	110	<b>第 9 章</b>	<b>开关电容电路</b>	<b>133</b>
7.5.1	双极型晶体管 开关	110	9.1	开关电容电路的组成	133
7.5.2	CMOS 模拟开关	111	9.1.1	MOS 电容	133
7.6	双极性输出的 D/A 转换器	111	9.1.2	时钟信号	133
7.7	D/A 转换器的转换误差和 主要技术指标	112	9.1.3	MOS 模拟开关	134
7.7.1	D/A 转换器的 转换误差	112	9.1.4	MOS 运算放大器	134
7.7.2	D/A 转换器的 技术指标	113	9.2	开关电容单元电路	135
7.8	集成 D/A 转换器 5G7520	113	9.2.1	并联型开关电容 电路	135
7.8.1	5G7520 的结构和 工作原理	114	9.2.2	串联型开关电容 电路	135
7.8.2	5G7520 应用 实例	115	9.3	基本开关电容电路	136
练习七		117	9.3.1	开关电容一阶 RC 无源低通滤波器	136
<b>第 8 章</b>	<b>模数转换器</b>	<b>118</b>	9.3.2	开关电容积分器	137
8.1	量化和编码	118	9.3.3	开关电容振荡器	139
8.2	直接转换型 A/D 转换器	119	9.3.4	开关电容 A/D 转换器	139
8.2.1	计数式 A/D 转换器	119	参考文献		142

# 绪 论

简单地说,模拟电路就是处理模拟信号的电路。其特点是:电路的输出是一个或一些连续变化的模拟信号。本章介绍模拟集成电路的一般性问题,是后续各章内容的基础和预备知识。

## 1.1 模拟集成电路的发展

现代电子技术包含模拟电子技术和数字电子技术两大领域,最早发展起来的是模拟电子技术。

1883年,美国科学家爱迪生(T. Edison)为寻找电灯泡最佳灯丝材料,曾做过一项实验。他在真空电灯泡内部碳丝附近安装一小截铜丝,希望铜丝能阻止碳丝蒸发。实验结果非他所想,但他发现,放在真空管中的铜丝,因接收到碳丝发射的热电子而产生了微弱的电流。爱迪生并没有重视这个现象,只是把它记录在案,并称之为“爱迪生效应”。

1885年,30岁的英国电气工程师弗莱明(J. Fleming)就“爱迪生效应”坚持认为,一定可以为热电子真空发射找到实际用途。后来他通过试验发现,如果在真空灯泡里装上碳丝和铜板,分别充当阴极和屏极,灯泡里的电子就能实现单向流动。后在1904年,弗莱明研制出一种能够充当交流电整流和无线电检波的特殊灯泡——“热离子阀”,从而催生了世界上第一只电子管,也就是人们所说的真空二极管,如图1.1.1所示。

然而,直到真空三极管发明后,电子管才成为实用的器件。真空三极管的发明者是美国工程师德·福雷斯特(D. Forest)。为了提高真空二极管的检波灵敏度,德·福雷斯特于1906年在弗莱明的玻璃管内添加了栅栏式的金属网,形成第三个极。这个“栅极”仿佛就像百叶窗那样,能控制阴极与屏极之间的电子流;只要栅极有微弱电流通过,就可在屏极获得较大的电流,而且波形与栅极电压完全一致,标志着这是一种能够起放大作用的真空三极管器件。

不久他还发现,真空三极管除了可以处于放大状态外,还可充当开关器件,其速度要比继电器快成千上万倍。电子管很快受到计算机研制者的青睐,计算机的历史也由此跨进电子的纪元。

1947年12月23日,第一只晶体管——Ge晶体管在美国贝尔实验室由巴丁(J. Bardeen)、肖克莱(W. Schokley)和布拉顿(W. H. Brattain)发明,如图1.1.2所示,他们因此获得1956年诺贝尔物理学奖。晶体管的问世使电子器件开始向低功耗小型化发展,其应用领域也不断拓宽。20世纪50年代是电子管、晶体管并存的年代,也是晶体管在电子技术领域里逐渐取代电子管的时代。



图 1.1.1 世界上第一只电子管  
(真空二极管)

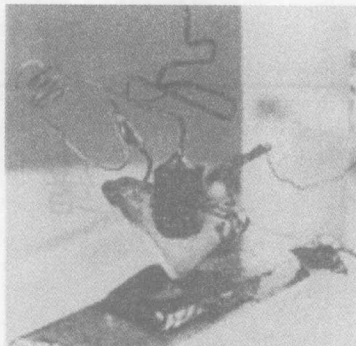


图 1.1.2 世界上第一只晶体管

1960 年出现硅平面工艺,在此基础上,集成电路开始飞速发展,在模拟集成电路发展的同时,数字集成电路则以其工艺较简单,集成度高等特点迅速发展起来,其发展速度远超过模拟集成电路,并在很多应用中取代了模拟电路。20 世纪 80 年代初期曾有人说,由于数字信号的处理能力迅猛发展,精度远高于模拟信号,模拟电路将逐渐消失。然而二十多年过去了,模拟电路并没有消失。相反地,模拟集成电路却得到了长足的发展。

尽管许多类型的信号可以用数字的方式去处理,但复杂的信号仍需要用模拟的方式来处理。自然界产生的原始信号大多数为模拟量,如温度、压力、速度、加速度、声音、图像等都是在时间上和幅度上连续变化的模拟量,如图 1.1.3 所示。而且很多信号是极其微弱的,要首先进行模拟放大和去干扰,才能加以利用。模拟电子技术在许多领域中的优势是难以动摇的。模拟集成电路已广泛应用于信号放大、频率变换、模拟运算、计算机接口、自动控制、卫星通信等领域。在收音机、电视机和移动通信机等设备中还出现了单片模拟集成电路。

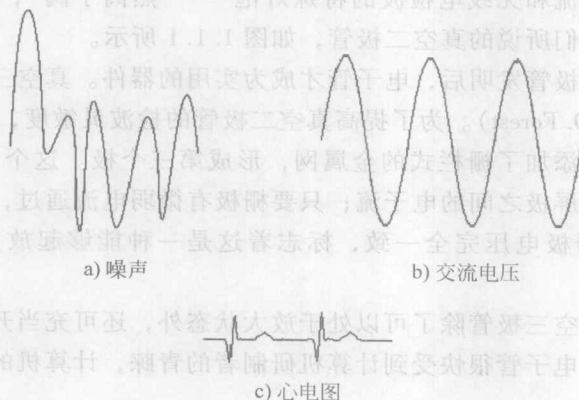


图 1.1.3 模拟信号

一般来说,模拟集成电路在技术上比数字集成电路更复杂、更难实现。需要我们投入更多的人力和物力去发展模拟集成电路技术。

## 1.2 模拟集成电路的特点

集成电路(integrated circuit), 又称为集成电路芯片或半导体芯片, 是指以半导体材料为基片, 将组成电路的多个元件, 其中至少有一个是有源元件, 互连集成在基片内部或者表面以执行某种电子功能的产品。模拟集成电路只有少量输入、输出线及电源线和外部连接, 其解剖示意图如图 1.2.1 所示。与分立元件电路相比, 它体积小、重量轻、功耗低、可靠性高。集成电路是在严密的高度清洁的环境中制造的, 并经严格的筛选和测试, 因而可以长时间稳定地工作。集成电路是大规模批量生产, 因而生产成本低, 有很强的市场竞争力。

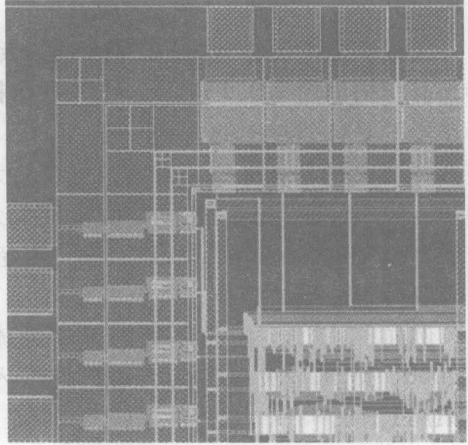


图 1.2.1 集成电路的解剖示意图

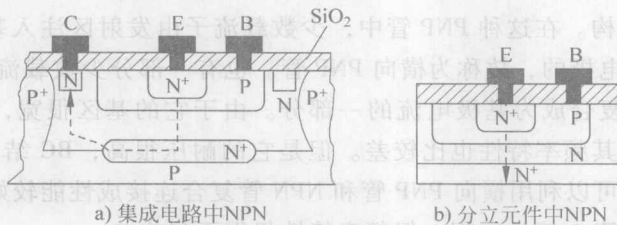
集成电路的元器件制作在一块硅片上, 它们之间存在着寄生效应, 对电路性能会产生一些不利的影响。由于工艺上的原因, 集成电路中的元器件参量绝对精度不高, 但相对精度很高。另一方面, 集成电路的制作以晶体管为核心, 其他元件则受到一定的限制和影响。如电阻和电容的取值范围有一定的限制; 电感、变压器则不能制作在硅片上, 因而电路结构、设计思想和分立元件有较大的区别。

模拟集成电路和数字集成电路相比, 它对器件的线性范围、频率响应、功率耗散、抗干扰能力、温度漂移等方面的要求都比较高。另一方面, 模拟集成电路中元器件的种类较多。因而, 模拟集成电路的制造工艺要比数字集成电路复杂。

## 1.3 模拟集成电路中的元器件

### 1.3.1 NPN 型晶体管

集成电路中的晶体管以 NPN 型三极管为主。在半导体中, 电子的迁移率和扩散系数都比空穴大, 使得 NPN 型晶体管的许多特性指标都比 PNP 型晶体管好。图 1.3.1 示出集成电路中的 NPN 型晶体管和分立元件的晶体管的不同。它的集电极引线要和 E、B 极在同一面



a) 集成电路中NPN

b) 分立元件中NPN

图 1.3.1 NPN 晶体管的结构

上, 因而电流要流过一个狭长的 N 型区, 为了减小集电极串联电阻, 降低集电极的压降, 要在集电极的 N 型区和 P 型衬底之间设置一个  $N^+$  掩埋层, 以改善 NPN 管的特性。在分立元件的 NPN 晶体管中, 其 N 型衬底即为集电极, 不需要掩埋层。

### 1.3.2 超 $\beta$ 晶体管

为提高电路的输入阻抗, 降低输入级的偏置电流, 在模拟集成电路中采用了超  $\beta$  晶体管, 其结构如图 1.3.2 所示。从结构上来讲, 超  $\beta$  晶体管的基区特别薄, 只有  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ , 而普通的晶体管的基区厚度一般为  $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ , 这样超  $\beta$  晶体管的基极电流非常小, 电流放大系数  $\beta$  高达  $2000 \sim 5000$ , 但其击穿电压很低, 最大允许反向击穿电压  $BV_{\text{ceo}}$  通常小于  $5\text{V}$ 。所以, 在使用超  $\beta$  晶体管时, 要采取一定的保护措施, 避免击穿。

例如, 一个超  $\beta$  晶体管的工作电流为  $10 \mu\text{A}$ ,  $\beta$  为  $2000$ , 则其基极电流为  $5\text{nA}$ , 其输入电阻可高达  $10\text{M}\Omega$  以上。

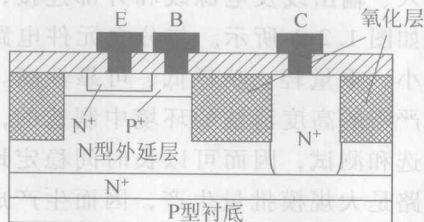


图 1.3.2 超  $\beta$  晶体管的结构

### 1.3.3 PNP 型晶体管

在模拟集成电路中, 有时也要用到 PNP 型晶体管。如在有源负载电路中、电平位移电路中及互补推挽电路中都要用到 PNP 管, 其结构如图 1.3.3 所示。在集成电路中, 常用的 PNP 管有横向 PNP 管和纵向 PNP 管两种。

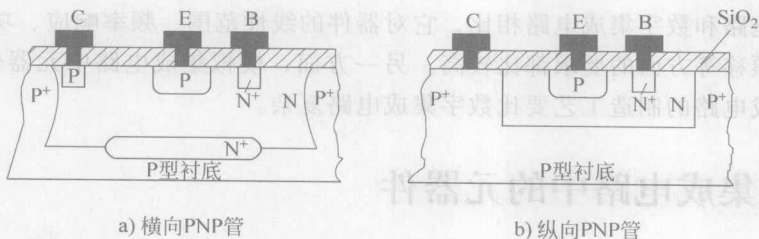


图 1.3.3 PNP 型晶体管的结构

集成电路的衬底为 P 型, 在衬底上外延生长一个 N 型层, NPN 管就做在这个外延层上, 这是 NPN 管的集电极。为了使 PNP 管的制作工艺和 NPN 管兼容, 外延层就当作横向 PNP 管的基区, 而在扩散形成 NPN 管的 P 型基区的同时, 形成 PNP 管的发射区和集电区。再扩散形成 NPN 管发射极引出孔  $N^+$  区, 这时, 同时形成 PNP 的基极  $N^+$  引出接触点。图 1.3.3a 给出了横向 PNP 管的结构。在这种 PNP 管中, 少数载流子由发射区注入基区后, 是沿着平行于表面的方向流向集电极的, 故称为横向 PNP 管。也有一部分少数载流子是沿纵向扩散的, 这部分载流子在基区复合成为基极电流的一部分。由于它的基区很宽, 电流放大系数  $\beta$  很小, 一般只有  $3 \sim 5$ , 其频率特性也比较差。但是它的耐压很高, BC 结和 BE 结的击穿电压可达  $80\text{V}$  以上。我们可以利用横向 PNP 管和 NPN 管复合连接成性能较好的等效 PNP 管。复合管的等效  $\beta$  值是两管  $\beta$  值的乘积, 但频率特性仍得不到改善。

纵向 PNP 是以 P 型衬底作为集电极, 所以又称为衬底 PNP 管。NPN 管集电极 (N 型外



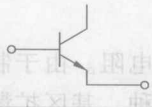
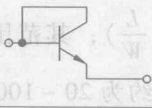
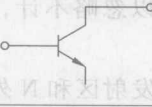
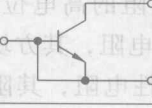
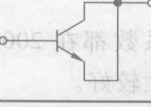
延层)作为 PNP 管的基极,而发射极则在制作 NPN 管基区的同时生成,其结构如图 1.3.3b 所示。这种 PNP 管的电流是纵向流动的,故称为纵向 PNP 管。只有在 PN 结隔离的集成电路中才能采用这种 PNP 管,它的集电极(衬底)总要接在电路的最低电位上,即集电极是交流的零电位,所以只能用作射极输出器。纵向 PNP 管的  $\beta$  值比横向 PNP 管大,一般在 50 以下,其频率特性也不好,  $f_T$  较低。纵向 PNP 管多用来和 NPN 管复合构成互补输出级的 PNP 管。

另有一种高性能的 PNP 管,是用多晶硅介质隔离的 PNP 管,其结构与正常的 NPN 管相似。但其制作工艺较复杂,不能完全和 NPN 管的制作工艺兼容,因而成本较高,只有在要求较高的情况下才采用它。

### 1.3.4 二极管

在集成电路中,不需要特别制作二极管,而是适当连接 NPN 管的电极构成二极管。可以利用 NPN 管的发射结、集电结、BC 短路的发射结、BE 短路的集电结以及 CE 短路后两结的并联作为二极管使用,不同形式二极管的比较如表 1.3.1 所示。根据耐压高低、存储时间长短和等效电阻的大小来选择使用,常用的是前三种,最常用的是将 BC 短路的发射结。它具有三极管的作用,流过基区电阻的电流仅为二极管总电流的  $1/(1+\beta)$ ,因而等效电阻小。在电压由正向转为反向时,存储在基区的载流子能很快由集电极流出,存储时间最短。单用集电结其耐压较高(50V 以上),单用发射结其耐压较低(小于 7V)。但发射区杂质浓度高,单独使用反向的发射结可以当稳压管使用,其稳压值小于 7V,其动态电阻为  $60 \sim 100\Omega$ ,比分立元件稳压管差一些。

表 1.3.1 不同形式二极管的比较

二极管形式	等效电阻	击穿电压	寄生 PNP 管	存储时间
	低	低	无	长
	最低	低	无	短
	高	高	有	长
	高	高	有	长
	高	低	有	长