

高等学校教材

模拟集成电路 分析与设计

谢沅清 解月珍

华中理工大学出版社

.1

模拟集成电路分析与设计

谢沅清 解月珍

责任编辑 李凤英

责任校对 卢金锋

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.25 字数: 246 000

1990年5月第1版 1990年5月第1次印刷

印数: 1—2 000

ISBN 7-5609-1417-8/TN·14

定价: 2.04

内 容 简 介

本书内容包括模拟集成电路中的元器件、偏置电路、基本放大级、MOS模拟集成电路、运算放大器与比较器、集成振荡器、集成稳压器、模拟相乘器、定时电路、集成锁相环、开关电容滤波器、D/A与A/D变换电路。

本书着重讲述模拟集成电路的电路分析与设计，而以分析为主。全书分十章。前四章详细讲述模拟集成电路中的元器件及基本子电路，后六章以方框图替代子电路讲述功能块，以求简明清晰。

本书可作为高等学校微电子学、应用电子学专业的必修课和无线电通信、无线电技术专业的选修课教材，也可供从事模拟集成电路制造或应用的技术人员参考。

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、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年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续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“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，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。广大编审者、各编审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、出版工作还会有缺点和不足之处，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1986~1990年编审出版规划，由无线电技术与信息系统编审委员会电路与系统编审小组征稿，推荐出版，责任编辑张肃文。

本教材由北京邮电学院谢沅清担任主编，武汉空军雷达学院刘明德担任主审。

本课程的参考学时数为34学时，其主要内容为模拟集成电路的电路分析与设计，而以分析为主。在教材的前四章讲述模拟集成电路中的元器件和主要子电路。后面六章分别讲述各种集成功能块，它们是运算放大器与电压比较器、集成振荡器、集成稳压器、模拟相乘器、定时电路与集成锁相环、开关电容滤波器、D/A与A/D变换器。在讲述功能块时，在多数情况下用简化电路讲述，且不一一讲述所有细节。给出的原理图也往往是简化图，一些通用子电路，用符号或方框表示，这样既使画面清晰，又可突出重点。

在编写本教材时，考虑到了供微电子学专业本科生以及无线电技术与通信、应用电子学专业的选修课通用。对于前者，通过本课程的学习，为毕业后从事模拟集成电路的电路设计打下一个基础。对于后者，通过本课程的学习，可以增进对集成块的内部电路的了解，这对于应用集成块是十分必要的。编者认为，应用模拟集成电路和应用数字集成电路有显著不同。数字集成电路的输出电平只有“1”和“0”两种电平，使用者只需明白电路的逻辑关系而不必对内部电路深究。模拟集成电路则不同，它的输出电平是连续变化的，而且往往要配接以较多的外围元器件。电路在使用过程中出现不正常现象时，了解集成块内部电路有助于查

找故障和调整外围元件。

为了兼顾上述两类不同性质专业学习上的需要，本书在取材上以电路为主，只是在十分必要时才涉及版图。编者认为，对于微电子专业，应另开设一门有关版图设计的课程，不宜将其与电路分析、设计合在一起，否则会将一门课弄得十分庞大。

本教材由谢沅清编写第一、四、六、八、九、十章，解月珍编写第二、三、五、七章，谢沅清统编全稿。参加审阅工作的还有华中理工大学肖华昌同志，为本书提出许多宝贵意见，这里表示诚挚的感谢。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—

目 录

第一章 集成电路中的元器件

§ 1-1 NPN晶体管	(2)
1-1-1 器件结构.....	(2)
1-1-2 集成晶体管的寄生元件.....	(4)
1-1-3 特殊用途的NPN晶体管	(5)
§ 1-2 PNP晶体管	(9)
1-2-1 横向PNP管	(9)
1-2-2 衬底PNP管	(12)
1-2-3 高性能PNP管	(12)
§ 1-3 集成电路中的结型场效应管	(13)
1-3-1 双扩散结型场效应管.....	(13)
1-3-2 离子注入结型场效应管.....	(14)
§ 1-4 集成电路中的MOS场效应管.....	(15)
1-4-1 双极型器件与MOS器件兼容的结构	(15)
1-4-2 CMOS 场效应管结构	(16)
§ 1-5 二极管.....	(16)
1-5-1 结二极管.....	(16)
1-5-2 肖特基二极管.....	(20)
§ 1-6 集成电路中的电阻	(21)
1-6-1 扩散电阻.....	(22)
1-6-2 沟道电阻.....	(24)
§ 1-7 集成电路中的电容	(26)
1-7-1 结电容.....	(26)
1-7-2 MOS电容	(27)
习题及思考题.....	(28)

第二章 偏置电路

§ 2-1 恒流电路.....	(30)
-----------------	--------

2-1-1 基本的电流镜.....	(31)
2-1-2 具有基极电流补偿的电流镜.....	(33)
2-1-3 电阻比例电流镜.....	(34)
2-1-4 威尔逊 (Wilson) 电流镜	(35)
§ 2-2 PNP电流镜	(36)
§ 2-3 压控电流源	(38)
§ 2-4 受电源电压变化影响小的偏置	(38)
2-4-1 用 V_{BE} 作基准的偏置	(39)
2-4-2 自给基准电流偏置.....	(40)
§ 2-5 电压源	(41)
2-5-1 通用电压源.....	(41)
2-5-2 基准电压源.....	(43)
§ 2-6 直流电平移动电路	(50)
§ 2-7 基片的温度稳定	(51)
习题及思考题.....	(54)

第三章 基本放大级

§ 3-1 特种单端输出差动放大电路.....	(55)
3-1-1 高增益放大级.....	(55)
3-1-2 输入级采用复合NPN-PNP管的差动放大级	(56)
3-1-3 扩展共模输入电压下限值的电路.....	(57)
§ 3-2 平衡电流输出差动放大器.....	(58)
§ 3-3 电流差动放大级	(59)
§ 3-4 输出级	(60)
3-4-1 射极跟随输出级.....	(61)
3-4-2 全NPN乙类输出级	(63)
§ 3-5 短路保护.....	(65)
3-5-1 无源元件限流.....	(65)
3-5-2 有源元件限流.....	(66)
习题及思考题.....	(68)

第四章 MOS模拟集成电路

§ 4-1 MOS器件的主要特性	(69)
------------------------	--------

4-1-1	MOS三极管的伏安特性	(69)
4-1-2	MOS二极管及其应用	(70)
4-1-3	MOS三极管的高频放大能力	(72)
4-1-4	衬底效应	(73)
§ 4-2	NMOS管放大电路	(73)
4-2-1	基本放大电路	(73)
4-2-2	MOS共源-共栅 (Cascode) 放大级	(75)
4-2-3	源极跟随器	(76)
4-2-4	MOS电流镜	(77)
4-2-5	MOS差动电路	(77)
4-2-6	直流电平移动电路	(79)
4-2-7	输出级	(80)
4-2-8	以耗尽型器件作有源负载的放大级	(81)
§ 4-3	CMOS电路	(83)
4-3-1	CMOS倒相级	(83)
4-3-2	CMOS差动放大级	(85)
4-3-3	推挽放大级	(86)
4-3-4	输出级	(87)
§ 4-4	模拟开关	(88)
4-4-1	单掷开关	(89)
4-4-2	双掷开关	(91)
	习题及思考题	(93)

第五章 运算放大器与电压比较器

§ 5-1	单片运算放大器的电路构成	(94)
5-1-1	只含单个放大级的运放	(94)
5-1-2	包含两个放大级的运放	(96)
5-1-3	具有三个放大级的运放	(97)
§ 5-2	频率补偿	(99)
5-2-1	具有两个放大级的运放的电容补偿	(99)
5-2-2	采用分裂集电极晶体管技术减小输入级跨导	(101)
5-2-3	前馈补偿	(102)
§ 5-3	大信号运用	(103)

5-3-1	电压摆动速率与补偿元件的关系	(103)
5-3-2	增大摆动速率的方法	(105)
5-3-3	满功率带宽	(107)
§ 5-4	输入级设计	(108)
5-4-1	PNP输入级	(109)
5-4-2	NPN输入级	(109)
5-4-3	结型场效应管输入级	(110)
5-4-4	低偏流输入级	(111)
5-4-5	低失调输入级	(113)
§ 5-5	MOS运算放大器	(117)
5-5-1	CMOS运放	(117)
5-5-2	自校零运放(斩波稳零运放)	(118)
§ 5-6	特种用途运算放大器	(119)
5-6-1	跨导运算放大器	(119)
5-6-2	电压跟随器	(121)
§ 5-7	实际运算放大器电路	(125)
5-7-1	$\mu\text{A}741$ 通用型运算放大器电路分析	(125)
5-7-2	$\mu\text{A}733$ 宽频带集成放大器电路分析	(139)
§ 5-8	电压比较器	(144)
5-8-1	电压比较器的特点	(144)
5-8-2	高速集成电压比较器HIC01的分析与设计	(146)
	习题及思考题	(155)

第六章 集成振荡器

§ 6-1	两类振荡器的特点	(156)
§ 6-2	RC张弛振荡器	(158)
6-2-1	基本电路及工作原理	(158)
6-2-2	采用单比较器型施密特触发器的RC张弛振荡器	(161)
6-2-3	采用双比较器型施密特触发器的RC张弛振荡器	(163)
6-2-4	恒流充放电振荡器	(165)
§ 6-3	射极耦合多谐振荡器	(168)
6-3-1	基本电路	(168)
6-3-2	温度稳定性的改进	(171)

§ 6-4	CMOS张弛振荡器	(176)
§ 6-5	张弛振荡器的限制	(181)
6-5-1	高频容限	(181)
6-5-2	温度稳定	(183)
6-5-3	结论	(186)
习题及思考题		(186)

第七章 集成稳压器

§ 7-1	基本的串联式稳压器	(188)
7-1-1	工作原理	(188)
7-1-2	负压稳压器	(190)
7-1-3	双踪稳压器	(191)
7-1-4	主要性能参数	(192)
§ 7-2	串联稳压器的保护电路	(194)
7-2-1	限流或短路保护	(195)
7-2-2	转折限流	(196)
7-2-3	安全区保护	(197)
7-2-4	热闭锁	(199)
§ 7-3	实际串联稳压器电路	(200)
7-3-1	$\mu\text{A}-7800$ 集成稳压器的工作原理	(201)
7-3-2	$\mu\text{A}-7800$ 主要特性参数分析	(202)
§ 7-4	开关稳压电源	(203)
7-4-1	开关稳压电源的基本工作原理	(203)
7-4-2	占空比的控制	(209)
7-4-3	具有电感输出电路的稳压器的的工作模式	(210)
习题及思考题		(215)

第八章 模拟相乘器、定时电路和集成锁相环

§ 8-1	模拟相乘器	(216)
8-1-1	基本工作原理	(216)
8-1-2	相乘器的误差	(220)
§ 8-2	单片定时电路	(221)
8-2-1	单片定时电路逻辑方框图	(221)

8-2-2	555定时电路的内部电路	(222)
8-2-3	555定时电路的定时工作原理	(224)
§ 8-3	集成锁相环	(226)
8-3-1	锁相环的工作原理	(226)
8-3-2	鉴相器	(227)
8-3-3	压控振荡器	(232)
8-3-4	单片锁相环设计举例	(236)
	习题及思考题	(239)

第九章 开关电容滤波器

§ 9-1	开关电容电路基础	(240)
9-1-1	基本开关电容电路	(240)
9-1-2	开关电容积分器	(243)
9-1-3	开关电容一阶低通滤波器	(245)
9-1-4	离散时间效应	(246)
§ 9-2	MOS开关电容电路元件的特性	(248)
9-2-1	MOS电容	(248)
9-2-2	MOS模拟开关	(249)
9-2-3	MOS运算放大器	(249)
9-2-4	噪声特性	(250)
§ 9-3	寄生电容的影响	(252)
§ 9-4	实际设计考虑	(256)
§ 9-5	二阶滤波器电路	(258)
9-5-1	低通滤波器的实现原理	(258)
9-5-2	设计举例	(263)
9-5-3	带通滤波器	(263)
§ 9-6	开关电容滤波器的应用及其限制	(266)
	习题及思考题	(268)

第十章 数字-模拟、模拟-数字变换器

§ 10-1	D/A变换器的变换原理	(270)
§ 10-2	D/A变换器的基本类型	(273)

10-2-1	电流标度D/A变换器.....	(273)
10-2-2	电压标度D/A变换器.....	(274)
10-2-3	电荷标度D/A变换器.....	(276)
10-2-4	基本D/A变换器电路综述.....	(278)
§ 10-3	电流标度D/A变换器的电路.....	(279)
10-3-1	采用二进制权电流源的电路.....	(279)
10-3-2	采用等值电流源的电路.....	(280)
10-3-3	主-从梯形网络.....	(281)
§ 10-4	电流开关.....	(282)
§ 10-5	A/D变换器的变换原理.....	(285)
10-5-1	基本工作原理.....	(285)
10-5-2	主要变换误差.....	(287)
§ 10-6	A/D变换器的基本类型.....	(291)
10-6-1	积分型A/D变换器.....	(291)
10-6-2	数字斜坡型A/D变换器.....	(296)
10-6-3	逐次逼近A/D变换器.....	(297)
10-6-4	采用MOS工艺的逐次逼近A/D变换器.....	(301)
10-6-5	并行A/D变换器.....	(304)
§ 10-7	A/D变换技术综述.....	(307)
	习题及思考题.....	(310)
	参考文献.....	(312)

第一章 集成电路中的元器件

集成电路中的元器件包括各种类型的晶体三极管、二极管及电阻、电容，它们的结构和电气性能，各有其特点。了解这些特点，对于电路的设计者来说，就可以在设计时恰当地选择各种元器件，在制造的简易和经济性以及各种电气指标之间，进行折衷处理，从而得到电路总体设计的优化。对于应用者来说，由于电路的性能往往主要取决于元器件，熟悉元器件特性，就能更好地了解电路的性能，从而能更正确和合理地使用电路。

集成电路中的元器件和分立元件电路中的有源器件相比，其中一个重要的特点就是，由于需要将众多的器件集成在一块硅片上，因而在结构上招致寄生效应影响元器件的特性。本章将介绍寄生效应形成的机理及其起作用的条件。

集成电路中的元器件的另一个重要特点是无源元件必须和有源元件在同一工艺下生产。这样，就使无源元件的种类和取值范围受到一定的限制。例如还不能制造电感；电阻和电容只能在一个很窄的范围内取值，而且它们的绝对值精度不高。二极管是利用有源器件的PN结。

集成电路中的无源元件的制作，虽然受到上述限制，可是也有其优于分立元件的特点，比如说其相对值可以做得相当精确，温度跟踪特性很好等。因此人们可以在电路设计上，充分利用其优点，避免其缺点。为此，作为一个集成电路的设计者，有必要了解集成无源元件的类型及其可能的取值范围，以便在设计电路时合理选择元件的类型和取值。基于上述原因，分立元件电路的某些设计考虑原则用到集成电路中来就不一定合适，有时适得其反。比如说，分立元件电路的造价，往往取决于有源器件的数目，而集成电路的造价，则往往取决于无源元件的绝对值，因为它

决定着硅片的面积。例如在分立元件电路中，电阻阻值的大小，一般不影响元件的体积与造价，而在集成电路中，电阻阻值偏大或偏小，都将使元件所占硅片面积增大，导致造价的提高。

§ 1-1 NPN晶体管

双极型 NPN晶体管因其性能优良，使得人们在集成电路的设计中，首先考虑采用NPN晶体管。因此，NPN晶体管成了集成电路中用得最多的器件。在集成电路的设计中，当选用其他类型器件时，应考虑到工艺上和双极型NPN晶体管兼容。下面各节中所介绍的其他类型的晶体管，其中不少就是考虑到工艺上和双极型NPN晶体管兼容而形成其结构上的某些特点，进而产生电气特性的某些特点。

1-1-1 器件结构

集成电路中的晶体管在结构上和分立元件晶体管的主要差别是各个器件集成在同一块硅片上的相互绝缘问题。为了便于读者理解，在图1-1中，除了在图 (a) 中画出了集成电路中的NPN

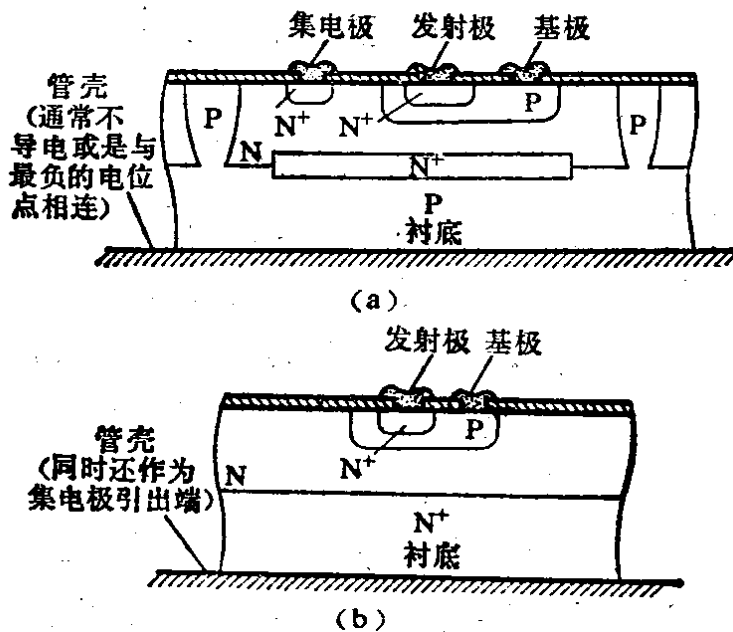


图1-1 NPN晶体管剖面图

晶体管的剖面图外，还在图 (b) 中画出了分立元件 NPN 晶体管的剖面图。从图1-1可以看出，就晶体管本身的结构来说，两种情况下是相似的。在图 (a) 所示的集成电路NPN晶体管剖面图中，N型集电区被P型半导体包围。所有各个器件的N型集电区，象一个个小岛一样被“安放”在一块称作衬底的P型片上。在实际运用中，如果将P型衬底连至整个电路的最低电位，而N型集电极在正常运用情况下，总是处于高电位，这样，每一个晶体管的N型集电区和P型衬底所构成的PN结，总是处于反向偏置下，于是各个晶体管就被这个反向PN结隔离开了。

图 (b) 所示的分立元件晶体管，集电极引线可以直接接于N⁺衬底。而在图 (a) 所示的集成电路中的晶体管，集电极引线接于晶片上的一小块面积。不难看出，后者增加一个寄生电阻，这是因为集电极电流要流经一个狭长的N区。

由图1-1 (a) 可以看出，P型衬底和P型基区夹着N型集电区，形成了一个潜在的PNP寄生晶体管。我们称之为潜在的PNP寄生晶体管，是因为这个PNP晶体管并不经常能发挥晶体管的放大作用。现给予说明。我们知道，作为一个处于放大状态的晶体管，它的发射结应处于正向偏压下。图1-1 (a) 所示的寄生PNP晶体管，其P型集电区和N型基区构成的PN结也就是正常NPN管的集电结，在正常工作情况下，是处于反向偏压下的。由N型集电区和P型衬底构成的PN结，为了起到隔离作

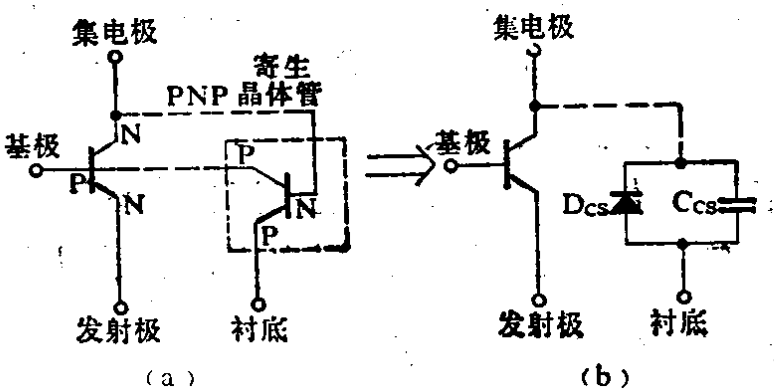


图1-2 正常工作状态下，寄生PNP晶体管保持截止时的等效电路

用，也处于反向偏压下。这样一来，在正常工作状态下，寄生PNP晶体管保持截止。在这种情况下，包围N型集电区的绝缘，可以看作反向的二极管 D_{CS} 和一个寄生电容 C_{GS} (PN结的势垒电容)相并联，其等效电路如图1-2所示。

有两种情况可能使寄生晶体管进入放大区。第一种情况是NPN晶体管工作进入饱和区，其基极电位比集电极高。于是NPN晶体管的集电结成为寄生PNP晶体管的放大状态下的发射结。这种情况下的等效电路如图1-3(a)所示。此时寄生晶体管产生的后果是寄生管的发射极电流取自NPN管的基极引线。

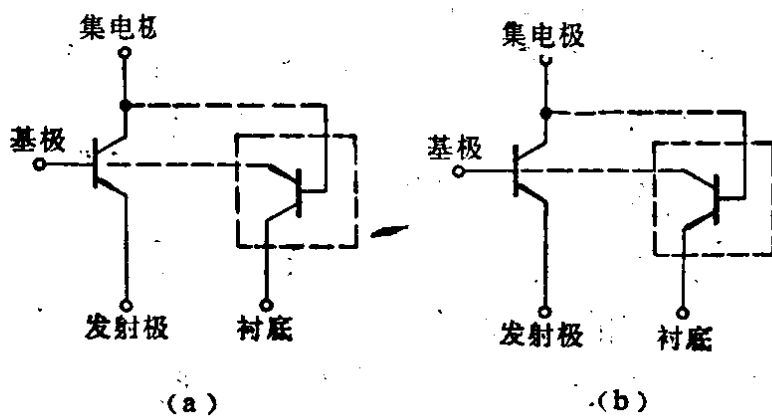


图1-3 寄生PNP晶体管工作于放大区的等效电路

另一种情况是NPN管的集电极电位比衬底电位还低。这种情况可能在若干块集成电路工作于不同的供电电源下，并且具有不同的衬底偏置，而它们又需要连接在一起运用时发生。衬底电位较底的集成电路向衬底电位较高的集成电路送来一个低电位，导致后者某个晶体管的集电极电位比其衬底电位还低。这样，由N型集电区和P型衬底构成的PN结成为寄生PNP晶体管的发射结。这种情况下的等效电路如图1-3(b)所示。此时寄生晶体管产生的后果是寄生管的集电极电流流向NPN管的基极引线。

以上两种情况，在设计和运用中应设法予以避免。

1-1-2 集成晶体管的寄生元件

在某些晶体管和晶体管电路教材中，介绍过分立元件晶体管