

模拟集成电路

运算放大器 与模拟乘法器

M. 赫皮

广西人民出版社

内 容 简 介

本书是模拟集成电路的专著。对运算放大器和模拟乘法器作了详细论述。本书第二、三章介绍集成电路工艺和晶体管电路的分析方法，第四章介绍线性集成电路的单元电路，第五、六、七章介绍集成运算放大器及其应用，第八、九章介绍模拟乘法器及其应用。

本书内容丰富，新颖，体系完整，基本上包括了这个领域的最新观点及成就。可供高等学校通信、雷达、测量、计算机、自动控制等专业的教师、研究生和高年级学生参考，也可供从事模拟集成电路研制、生产和应用的广大科技人员参考。

Analog Integrated Circuits
Operational Amplifiers and Analog Multipliers

Miklós Herpy 1980

译者序

模拟集成电路是六十年代中期迅速发展起来的一个崭新的技术领域。而集成运算放大器和模拟乘法器，又在模拟系统设计方法方面，起着决定性的作用，已成为模拟集成电路中的通用组件。众所周知，自然界的物理量，大部分都是以模拟量的形式出现。为了对这些物理量进行高精度的检测、变换和控制，模拟集成电路起着极其重要的作用；另外，在模拟量的数字化处理中，也是必不可少的环节。

1964年第一只单片集成运算放大器($\mu\text{A}702$)问世，是运算放大器发展史上的一次飞跃。以后，又以旺盛的生命力迅速向前发展，现其电路型式已经演变到了第四代，成为线性集成电路中最典型、品种和数量最多、应用最广泛的一种类型。另外，1968年B.Gilbert发表“具有亚毫微秒响应的精密四象限乘法器”以来，作为非线性应用的模拟乘法器，发展也非常迅速，已成为模拟集成电路中仅次于运算放大器的另一大类通用组件。如果说，集成运算放大器的出现，极大地推动了线性电子线路向集成化、微型化迅速过渡的话，那么，模拟乘法器的问世，又极大地推动了非线性电子线路的集成化、微型化的迅速发展。从而，为模拟电子线路按“块(Block)”来设计，以构成复杂的系统开辟了广阔的前景。

目前，虽然有关集成运算放大器的书籍很多，但是介绍模拟乘法器的却太少。以模拟集成电路为系统，论述运算放大器和模

拟乘法器的专著几乎没有。本书在很大程度上满足了这方面的要求。书中既有严格的理论分析，又有具体的实际应用。在运算放大器方面，特别是在模拟乘法器方面，有许多新颖内容和独到之处。因而，本书对于我国教育战线的师生、科学研究人员和生产单位的工程技术人员，都有广泛的参考价值。

参加本书译校工作的有：林卯心、陈朗皋、赵家宾、张德琨、陈民光、刘陆曦、杨益卿、姜天松、王喜成、徐凤翔等同志。

本书是根据1980年英文版译出，对原书中的笔误或排版错误，译者已作了改正。限于译者水平，不当之处在所难免，欢迎读者批评指正。

译 者

1982年5月于桂电

目 录

第一章 引言	(1)
第二章 单片集成电路工艺	(3)
2.1 NPN晶体管	(3)
2.2 电阻器	(8)
2.3 电容器	(10)
2.4 PNP晶体管	(12)
2.5 二极管	(14)
2.6 场效应晶体管	(15)
2.7 制造技术	(17)
第三章 晶体管电路分析	(22)
3.1 双端口参数	(22)
3.2 反馈	(27)
3.3 晶体管参数	(31)
3.4 晶体管的基本组态	(34)
3.5 温度关系	(36)
3.6 噪声	(41)
3.7 场效应晶体管	(46)
第四章 线性集成电路的单元电路	(50)
4.1 达林顿放大器	(52)
4.2 组合晶体管	(56)

4.3	横向PNP晶体管	(58)
4.4	差分放大器	(64)
4.4.1	传输特性	(64)
4.4.2	小信号运用	(69)
4.4.3	直流特性、失调电压和失调电流	(78)
4.4.4	失调的温度漂移	(81)
4.4.5	失调与电源的关系	(84)
4.4.6	差分放大器的特殊电路	(85)
4.4.7	噪声	(93)
4.5	电流控制的电流源	(94)
4.6	直流电流源	(96)
4.7	有源负载	(103)
4.8	相位相加网络	(105)
4.9	电平位移网络	(113)
4.10	输出级	(117)
第五章	集成运算放大器	(126)
5.1	运算放大器	(126)
5.2	集成运算放大器的方框图	(130)
5.3	参数	(132)
5.4	工作点调整	(142)
5.5	频率补偿	(151)
5.6	噪声	(160)
5.7	商品型号	(166)
5.7.1	笔型; $\mu A702$	(166)
5.7.2	通用型	(174)
5.7.3	可控型	(191)
5.7.4	低电流和低漂移型	(194)
5.7.5	高速型	(206)

5.7.6	AD520	(213)
5.7.7	LM3900	(216)
第六章	集成运算放大器的应用	(218)
6.1	反相放大器	(219)
6.2	同相放大器	(225)
6.3	运算放大器的误差来源	(229)
6.4	差分放大器	(236)
6.5	交流电压放大器	(244)
6.6	电流源	(246)
6.7	积分器	(254)
6.8	取样电路	(263)
6.9	微分器	(267)
6.10	对数和指数放大器	(269)
6.11	比较器	(278)
6.12	整流器	(289)
6.12.1	简单二极管整流器	(290)
6.12.2	运算放大器构成的半波整流器	(292)
6.12.3	运算放大器构成的全波整流器	(305)
6.12.4	运算放大器构成精确的均方根值整流器	(308)
6.12.5	运算放大器构成的峰值整流器	(311)
6.13	振荡器	(320)
6.13.1	文氏桥RC振荡器	(320)
6.13.2	双T型RC振荡器	(326)
6.13.3	双相振荡器	(331)
6.14	波形发生器	(332)
6.15	设计举例	(343)
第七章	RC有源滤波器	(354)
7.1	设计准则	(354)

7.2	低通网络函数的逼近	(356)
7.3	高通网络函数的逼近	(360)
7.4	带通网络函数的逼近	(360)
7.5	运算放大器构成有源滤波器	(362)
7.6	灵敏度	(363)
7.7	运算放大器的频率特性	(365)
7.8	调谐	(367)
7.9	设计举例	(368)
第八章 集成模拟乘法器		(402)
8.1	模拟乘法器	(402)
8.2	电压控制分流器型乘法器	(404)
8.3	电流控制分流器型乘法器	(407)
8.4	线性电压-电流变换器	(410)
8.5	电压控制四象限乘法器	(414)
8.6	电压控制四象限乘法器的误差来源	(417)
8.6.1	电流控制差分放大器的失调电压	(418)
8.6.2	电压-电流变换器的失调电压	(419)
8.6.3	电流-电压变换器的输出失调电压和 有限共模抑制比	(420)
8.6.4	标尺因子不精确	(422)
8.6.5	乘法器中晶体管的体电阻	(422)
8.6.6	乘法器中晶体管的有限电流增益	(424)
8.6.7	输入变换器的非线性	(425)
8.6.8	频率特性	(425)
8.7	四象限乘法器的误差补偿与调整方法	(427)
8.8	开关乘法器	(432)
8.9	乘法器的参数	(433)
8.10	商品型号	(436)

8.10.1	MC1595L	(436)
8.10.2	MC1594L	(439)
8.10.3	AD530	(442)
8.10.4	MC1596G	(445)
第九章	集成模拟乘法器的应用	(446)
9.1	除法电路	(446)
9.2	平方电路	(450)
9.3	开方电路	(450)
9.4	线性增益控制宽带放大器	(452)
9.5	波形发生器	(453)
9.6	整流器	(455)
9.7	调制器	(458)

第一章

引言

五十年代，电子学曾面临诸如电子设备日趋复杂和庞大所造成的可靠性等问题。这些问题由于半导体元件的采用得到了解决；而硅平面工艺的引入又把分立有源元件的可靠性提高了几个数量级。

到了六十年代初期，计算机和宇宙研究系统变得十分复杂，以至元件间的连接还不如元件本身可靠；加之研制和生产各种优质分立元件的成本很高，使设备的价格十分昂贵。要减小设备的尺寸和重量，就得减少内部连线，提高内部连接的质量，并增加元件密度。显然，单从元件本身考虑已无济于事，非采用崭新的方法不可，这便产生了现在广泛流行的集成概念。集成的优越性在于内部的各种元件及其连线可用一次制造过程来完成。

集成电路可分为两大类：混合结构和单片结构。混合结构是用丝网印制法、阴极溅射法或真空蒸发法，在绝缘衬底上（玻璃、陶瓷等）制成无源元件（电阻、小容量电容和内部连线），而有源元件、二极管和大容量电容器需要预制，分别将其装上。单片结构是把全部有源和无源元件都制作在单晶硅片上。单片集成电路适合于大批量生产，而混合集成电路则较适合于特殊用途电路的小批量生产。

最初，元件误差太大和组件的品种、数量的不足，似乎限制了单片集成电路在模拟系统中的应用。但是，随着工艺的改进以及互补晶体管、对称无源元件等应用技巧的提高，单片结构不仅可以和混合结构相匹敌，而且可以和用分立元件制造的常规电路

争高低。六十年代中期以来，单片工艺经历了从集成差分放大器那样的单级集成电路，迅速发展对参数有严格要求的多级模拟电路的过程。这些新型器件可分为下述两类：

——通用电路。这种电路可接成不同模式工作，并能构成更复杂的系统；

——功能电路。它们可执行一个完整系统的或一个较大的分系统的全部功能。

就功能电路来讲，集成电路设计者在系统设计工作中起了十分重要的作用，用户采用该电路时，通常不必再作进一步的设计。

目前，功能电路的应用尚限于日用电子设备，在电信、工业电子学、测量和控制等领域，仍以通用电路为主。通用电路中有两种器件特别有用，即运算放大器和模拟乘法器。运算放大器是线性和非线性应用中的基本部件。近几年来，由于可以大批量生产，且可广为采用，因而得以迅速发展。模拟乘法器主要用于非线性电路，其应用虽然不象运算放大器那样广泛，而重要性却是不相上下的。

鉴于模拟集成电路是一个复杂的课题，本书的取材仅限于上述两类电路。这不仅由于在种类繁多的应用中它们为最基本，且用途为最广者，还因为其设计都需要新方法，而阐明这种新设计原理正是本书的主要目的。

第二、三章扼要介绍单片集成工艺和晶体管电路分析的基础，第四章叙述基本线性集成电路的单元电路；第五、八章阐述运算放大器和模拟乘法器，其中对一批典型的商品器件作了详细介绍。第六、七、九章介绍运算放大器和模拟乘法器的应用。本书通篇这样安排，是考虑到依据电路单元来进行设计的方法已代替分级设计法；而且，目前工程师们设计的是较大规模的功能电路，而不是常规的部分电路。作者希望，以大量实例阐明的这种新设计原理，能为读者成功地解决书外的设计问题，奠定一个坚实的基础。

第二章

单片集成电路工艺

单片集成电路工艺是从外延平面晶体管工艺基础上发展起来的。平面晶体管是在 N^+ 型衬底上生长起来的 N 型外延层中，采用平面扩散工艺而形成的（见图2.1）。重掺杂使衬底具有高电导，从而使集电极电阻很小。但是，为了提供较高的集电极—基极的击穿电压及较小的电容，外延层应当是轻掺杂的。然后，首先向外延层扩散形成 P 型基区，再形成 N^+ 型发射区。两种扩散都是通过二氧化硅掩膜的光刻窗口来完成的。最后把晶片划片分成单个管芯，封装于管壳中。

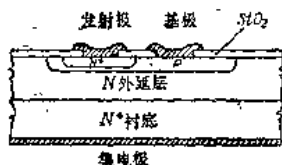


图2.1 硅外延平面晶体管的横截面

2.1 NPN晶体管

集成 NPN 晶体管的制造与分立晶体管的制造颇为相似。主要区别在于，各晶体管及其它组成元件共用一个公共衬底，而不是划片分成单个器件。因此，在结构上必须给各元件提供某种绝缘隔离。已研究的隔离方法有很多种，其中 PN 结隔离已证明最经济，且得到了最广泛的应用。 PN 结隔离就是把 N 型集电极区用 P 型材料包围起来，并使它在工作中保持反向偏置。

在实际情况中，第一道工序是在 P 型衬底上生长一层 N 型外延层。外延层的杂质浓度须选择为使集电极—基极击穿电压处于

40~100伏范围内。下一道工序是形成N型隔离小岛。这是通过P型隔离槽扩散到外延层中来完成的(见图2.2)。在小岛内,再扩散两次,便形成了NPN晶体管(见图2.3及本章引言)。NPN晶体管典型掺杂纵剖面如图2.4所示。由图可见,发射区的杂质浓度比集电区的杂质浓度要高好几个数量级。因此,发射极-基极击穿电压比集电极-基极击穿电压低得多。击穿电压 BV_{EBO} 的典型范围是6~7伏。

把衬底接于电路的最低电位处(电源的负极),则隔离PN

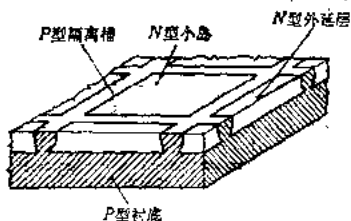


图2.2 P型衬底中的N型小岛

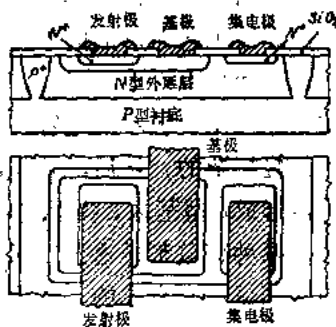


图2.3 用PN结隔离的集成晶体管

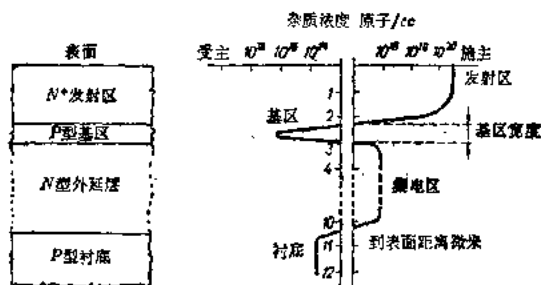


图2.4 NPN晶体管典型掺杂的纵剖面图

结将起反向偏置二极管的作用（见图2.5）。每个小岛将被两个串联的二极管隔离开来。通过这些二极管的漏电流是极小的，通常不会影响到包含在小岛内的电路。这一点用二极管的电阻来说明也是正确的，每个二极管的反向电阻值约为 $100\text{M}\Omega$ ，与集成电路设计中常用的电阻值比较，可忽略不计。

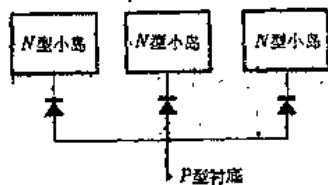


图2.5 被反向偏置PN结隔离的小岛模型

二极管的电容与其电阻和漏电流不一样，它对小岛内的电路有很大影响。例如对高频特性和开关速度的影响。这些集电极—衬底电容是跨接在集电极与小岛底部以及侧壁的寄生电容之和。由于集电区和衬底都是轻掺杂的，而且是突变结，因此底部每单位面积上的电容值是很小的。但底部面积相对来说却比较大。对于侧壁部分来说则相反：因为侧壁是扩散形成的，并且掺杂较重，因而单位面积电容较大，然而面积都较小。因此总的来说，底部和侧壁电容分量的数量级大体相同。为了减小这个电容，可以将电路尺寸设计得小一些，以便置于较小的隔离岛内。

总的集电极—衬底电容还与PN结的反向偏置大小有关。底部和侧壁分量分别与反向电压的平方根和立方根成正比。这种差异是由于底部的结是突变结，而侧壁的结几乎是线性缓变结。

由于存在隔离结，集成晶体管实际上是具有四层结构，其中基区和集电区加上衬底；形成附加的寄生PNP晶体管（见图2.4）。利用选择电位的办法，能够使这个寄生晶体管始终处于截止状态，在这种情况下，其影响通常可以忽略。

集成的和分立的晶体管，主要区别可归结为下面两点：

a) 由于集电极的引出点位于硅片的上表面，因而集电极电流要经过一段较长的路径。此外，集电区是用高电阻材料制成的，而且横截面积小。因此，集成晶体管的集电区电阻和饱和电

压都比较高，高频响应也比同类分立晶体管差一些。

b) 由于起隔离作用的PN结所形成的容性集电极负载，使高频响应更进一步受到限制。

减小集电区体电阻的一个有效的方法，是在外延层生长之前



图2.6 集成晶体管的隐埋层

向外型衬底扩散一层具有低电阻率的 N^+ 隐埋层。这个隐埋层旁路了高电阻集电区，给集电极电流提供了一个低电阻通路。其效果好象是在集电区底层敷了一层金属一样（见图2.6）。

集成NPN晶体管在交流小信号下运用时，可用图2.7所示修正过的等效电路来描述，它由传统的混合 π 型等效电路加上集电极体电阻 r_{cc} 和集电极—衬底电容 C_{cu} 组成。由于在典型情况下电容为 $1 \sim 3$ pF，因而对高频运用有明显的限制，而隐埋层使电阻 r_{cc} 减小到几十欧姆，从而对高频响应几乎没有影响，可以从等效电路中略去。

集成放大器的频率响应，主要受基极—集电极电容 $C_{b'c}$ 的限制，因此应尽可能使它小些。因为 $C_{b'c}$ 和基区体电阻 $r_{bb'}$ 两者都是基区杂质浓度的函数，通常对掺杂的选择应该使乘积 $r_{bb'} C_{b'c}$ 为

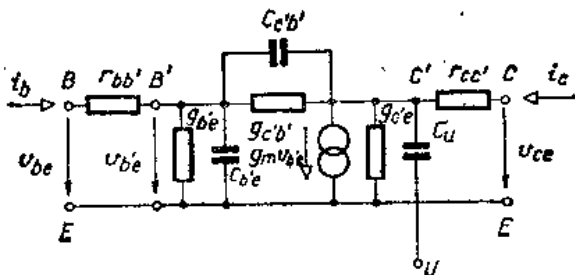


图2.7 集成晶体管物理等效电路

最优值。在多级放大器中，受控源的内阻通常比 r_{bb} 高得很多，这样，为使 C_{bc} 减到最小，即使会导致 r_{bb} 增加，使用上述浓度也是允许的。

发射区是由低电阻率材料制成。因此，发射区体电阻和发射极—基极击穿电压都较小，其典型值分别为2~3欧和6~7伏。

集成NPN晶体管典型参数汇集于表2.1中。

表2.1 集成NPN晶体管参数

参 数	符 号	测 量 条 件	典 型 范 围
集电极—发射极击穿电压	BV_{CEO}	$I_C = 10\mu A$	40~60V
集电极—隔离槽击穿电压	BV_{CUO}	$I_C = 10\mu A$	60~100V
发射极—基极击穿电压	BV_{EBO}	$I_E = 10\mu A$	6~7V
直流电流增益	B	$I_C = 10\mu A \sim 1mA$	50~300
集电极—基极电容	C_{cb}	$V_{CB} = 10V$	0.1~0.3pF
集电极—衬底电容	C_{cu}	$V_{CU} = 5V$	1~3pF
基极—发射极电容	C_{be}	$V_{EB} = 0$	1~3pF
基区体电阻	r_{bb}'	—	20~100Ω
集电区体电阻	r_{cc}'	—	5~100Ω
特征频率	f_T	$I_C = 0.1mA$	400~800MHz

某些集成电路的输入级采用超β晶体管。这类晶体管的制作方法，是向基区更深地扩散成发射区，扩散深度几乎抵达集电区。因为不仅电流增益提高了，而且击穿特性也变软了，所以常采用自举或其他的电路设计技术，以保证集电极—基极电压几乎是零，且不受基极控制的影响。

2.2 电 阻 器

集成电阻器能够和有源元件同时制作。一种可能的方法是向N型外延小岛进行基区扩散而形成电阻（见图2.8）。可是，这种电阻的性能是由晶体管的制造过程预先确定的。可能得到的薄层电阻每方为100~200欧，可用来制作从20欧到50千欧范围内的电阻。薄层电阻率是一定的，因而所得的电阻值由扩散面的宽度和长度决定。由于宽度受有限光刻分辨率的限制，因此电阻值愈大就要求扩散电阻条相对地长一些。为了内部连接，需要一定大小的端头接触面积，它对电阻也稍有影响。

对于小阻值的电阻，则采用发射区扩散的方法（见图2.9）。重掺杂发射区的典型薄层电阻为每方2~3欧。

扩散电阻总是具有某种温度特性，温度对其影响的程度是杂质浓度的函数。例如，150欧/方的基区扩散电阻的温度系数大到+0.05~+0.2%/°C，而2.5欧/方的发射区扩散电阻仅为+0.01%/°C。

在用基区扩散形成电阻的情况下，由两个PN结的电容使其与衬底隔离。加于电阻上的寄生负载大小取决于隔离区连接的位置

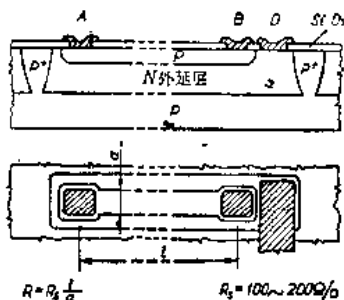


图2.8 基区扩散形成的电阻



图2.9 发射区扩散形成电阻