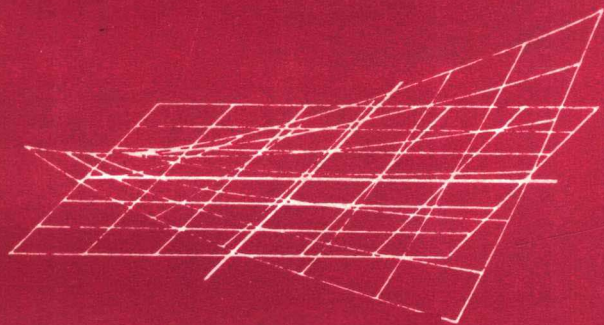


模拟集成电路

[匈]M. 赫彼 著

谢瑞和 译



高等教育出版社

模拟集成电路

[匈] M. 赫彼 著

谢瑞和 译

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是匈牙利学者 M. 赫彼在长期从事“模拟集成电路”课程教学和进行通信设备、电路设计的研究, 积累了丰富的基础上写出的, 受到本国及欧美的欢迎和重视。1973 年匈牙利文版问世, 并经修订, 接着相继出了二种德文版, 后又出了英文版。这个中译本就是根据美国约翰·威利公司 1980 年英文版译出的。

本书详细而系统地阐述了模拟集成电路的原理和应用, 理论分析严谨, 物理概念清楚, 注重具体介绍设计和应用中通常遇到的一般实际问题及解决方法, 能给人以启示并提供在一般手册和书刊中难以找到的大量资料, 内容丰富, 反映了直至 1980 年以前的新成果。它对于从事模拟集成电路的教学、应用、研究和生产的高校师生和科技工作者都不失为一本好参考书。

责任编辑 谭骏云

M. Herpy
ANALOG INTEGRATED CIRCUITS
WILEY 1980

模拟集成电路

[匈] M. 赫彼 著
谢瑞和 译

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.5 字数 420,000
1984 年 12 月第 1 版 1984 年 12 月第 1 次印刷
印数 00,001--12,700
书号 15010·0503 定价 4.40 元

译 者 序

本书是匈牙利学者 M. 赫彼的杰作。他从 1968 年开始就担任布达佩斯理工大学“模拟集成电路”的教学。在长期从事模拟集成电路教学和科研的基础上编写了这本教材。1973 年匈牙利文版问世, 以后又几经修订、多次再版, 并且受到德、美两国的欣赏, 先后被译成德文和英文。这个中译本就是根据美国约翰·威利父子公司 1980 年英文版译出的。书中首先简单地概括了集成电路的特点与制造工艺及晶体管电路的基本理论。接着, 详细地叙述了模拟集成电路的各部分单元电路, 系统地讨论了集成运算放大器与集成模拟乘法器的典型应用及分析和设计各种实际电路的一般方法。同时还介绍了集成运算放大器与仪用放大器及集成模拟乘法器的部分产品; 它们都具有代表性, 其中的大部分目前我国都有完全相同的或相似的产品与之对应。本书可作为高等学校电工程、无线电、自动化等专业的教学参考书, 也可供从事模拟集成电路研制及应用的科技人员参考。

在翻译过程中, 得到了我院院、系领导同志的热情支持和鼓励。特别是张肃文教授审阅了译稿并详细校对了部分章节, 对全书的翻译给予了具体的指导和帮助。北京航空学院张凤言同志校阅了全稿, 提出了许多宝贵的意见。我院的刘刚、屈万里同志分别对第二章、第四章提出了宝贵意见。谨在此一并致谢。

由于水平所限, 译文中难免有错误或不妥之处, 恳切地希望读者批评指正。

谢瑞和

1982 年 8 月于华中工学院

前 言

近几年来,单片模拟集成电路发展和推广得如此之快,以致于有关这方面的文献几乎无法跟上它的步伐。试图以现代方法解决设计问题的工程师就只好依赖于集成电路厂商的数据单、使用说明,或者充其量也不过是一些应用手册。但是,不管这些资料多么有用,也必定只限于某些给定电路模型的典型运用,而不会留下发挥个人创造性的余地。

本书试图帮助那些不满足于机械地沿用流行的解决方法的设计师们,它详细地介绍了线性集成电路的结构单元,描述了运算放大器和模拟乘法器的内部结构,并讨论了分析和设计实际电路的一般方法。书中也包含了一些经典的例子;相对于今天的标准来说,这些例子似乎是过时的东西,但这样做就会使得这一领域的初学者和经验比较丰富的读者都能为掌握当代电子学中蓬勃发展的这个分支所需要的新方法打下坚实的基础。

本书的原稿是由作者在布达佩斯工业大学写的讲义和在电信研究院的研究成果汇编而成的,并且对它进行了修订和补充,从而又概括了自匈牙利文版到英文版这段时间内的新成果。

在写作过程中,作者所在大学和研究院的同事给予了宝贵的帮助,谨在此表示深切的谢意。

M. 赫彼

目 录

译者序
前言

第一章 引言

第二章 单片集成电路技术

2.1	<i>NPN</i> 晶体管	4
2.2	电阻	9
2.3	电容	12
2.4	<i>PNP</i> 晶体管	14
2.5	二极管	17
2.6	场效应晶体管	18
2.7	制造工艺	20

第三章 晶体管电路分析

3.1	二端口参数	27
3.2	反馈	32
3.3	晶体管的参数	37
3.4	晶体管的基本组态	40
3.5	温度关系	50
3.6	噪声	51
3.7	场效应晶体管	56

第四章 线性集成电路的结构单元

4.1	达林顿放大器	62
4.2	复合晶体管	67

4.3	横向 PNP 晶体管	69
4.4	差动放大器	76
4.4.1	传输特性	76
4.4.2	小信号工作	82
4.4.3	直流特性参数, 失调电压和失调电流	92
4.4.4	失调与温度的关系, 温度漂移	95
4.4.5	失调与电源的关系, 电源漂移	99
4.4.6	主要的电路	99
4.4.7	噪声	109
4.5	流控电流源	110
4.6	直流电流源	112
4.7	有源负载	120
4.8	相位求和网络	123
4.9	电平移动网络	131
4.10	输出级	135

第五章 集成运算放大器

5.1	运算放大器	144
5.2	集成运算放大器的组成部分	148
5.3	参数	151
5.4	工作点调整	163
5.5	频率补偿	171
5.6	噪声	183
5.7	商用型产品	189
5.7.1	先驱者: $\mu\text{A} 702$	190
5.7.2	通用型	199
5.7.2.1	$\mu\text{A} 709$	199
5.7.2.2	$\mu\text{A} 741$	206
5.7.2.3	$\mu\text{A} 748$	213
5.7.2.4	$\mu\text{A} 799$	218
5.7.3	程控型	220

5.7.3.1	μ A 776	220
5.7.3.2	CA 3080	222
5.7.4	低电流与低漂移型	224
5.7.4.1	μ A 726	224
5.7.4.2	μ A 725	225
5.7.4.3	μ A 740	229
5.7.4.4	LM 108	231
5.7.4.5	LF 155, LF 156, LF 157	234
5.7.5	高速型	237
5.7.5.1	μ A 715	237
5.7.5.2	LM 118	243
5.7.5.3	CA 3130	245
5.7.6	AD 520	247
5.7.7	LM 3900	250

第六章 集成运算放大器的应用

6.1	反相反馈放大器	253
6.2	同相反馈放大器	259
6.3	反馈运算放大器的误差源	263
6.4	差动放大器	269
6.5	交流电压放大器	278
6.6	电流源	281
6.7	积分器	289
6.8	采样电路	299
6.9	微分器	304
6.10	对数与指数放大器	307
6.11	比较器	316
6.12	整流器	328
6.12.1	简单二极管整流器	329
6.12.2	使用运算放大器的半波整流器	332
6.12.3	使用运算放大器的全波整流器	345

6.12.4	使用运算放大器的有效值整流器	349
6.12.5	使用运算放大器的峰值整流器	352
6.13	振荡器	361
6.13.1	文氏桥式 RC 振荡器	361
6.13.2	双 TRC 振荡器	367
6.13.3	两相振荡器	373
6.14	波形发生器	374
6.15	设计举例	387

第七章 有源 RC 滤波器

7.1	设计特点	401
7.2	低通网络函数的逼近	403
7.3	高通网络函数的逼近	424
7.4	带通网络函数的逼近	424
7.5	用运算放大器实现的电路	429
7.6	灵敏度	442
7.7	运算放大器的频率关系引入的误差	443
7.8	调谐	445
7.9	设计举例	447

第八章 集成模拟乘法器

8.1	模拟乘法器	453
8.2	用压控分流器相乘	455
8.3	用流控分流器相乘	459
8.4	线性电压-电流变换器	462
8.5	压控四象限乘法器	466
8.6	压控四象限乘法器的误差源	470
8.6.1	流控差动放大器的失调电压	471
8.6.2	电压-电流变换器的失调电压	473

8.6.3	电流-电压变换器的输出失调电压与有限的共模抑制	475
8.6.4	标尺因子的偏差	476
8.6.5	乘法器晶体管的分布电阻	477
8.6.6	乘法器晶体管的有限电流增益	479
8.6.7	输入变换器的非线性	479
8.6.8	频率关系	480
8.7	四象限乘法器的误差补偿、调整方法	481
8.8	开关乘法器	487
8.9	乘法器的参数	488
8.10	商用型产品	491
8.10.1	MC 1595 L	492
8.10.2	MC 1594 L	496
8.10.3	AD 530	499
8.10.4	MC 1596 G	501

第九章 集成模拟乘法器的应用

9.1	除法电路	503
9.2	平方电路	507
9.3	平方根电路	508
9.4	线性增益控制的宽带放大器	510
9.5	波形发生器	512
9.6	整流器	514
9.7	调制器	517
	参考文献	519
	索引	533

第一章 引言

在五十年代,电子学面临着新的挑战,例如,由于设备和系统的复杂程度与体积的迅速增加而产生了可靠性等问题。借助于半导体器件和随后出现的硅平面技术使这些问题得到了解决,从而使分立有源器件的可靠性提高了几个数量级。

六十年代初,计算机和空间研究系统的复杂性达到了其内部连接还不如元件本身可靠的程度。此外,由于研究和生产各种各样的高质量分立元件而使得这些设备的造价极高。因此,必须有连线较少但又可靠的内部连接,并且,为了减小体积和重量,又必须增加元件的密度。很清楚,仅在元件上打主意是不够的,因为如不采用一种崭新的方法,上面提出的要求就不可能满足。对这些事实的理解就产生了现在众所周知的集成概念。它的优越性在于,利用单纯的制造工艺就能得到电路元件的内部互连组合。

集成电路可以分成两种基本类型:混合结构和单片结构。混合结构是使用丝网印制电路法、阴极溅射法、或真空蒸发法在一块绝缘基片(玻璃、陶瓷等)上形成无源元件(电阻、小容量电容、内部连线等),而有源元件、二极管和大容量电容则是预先制作好,分别安装上去的。在单片结构中,所有的元件,有源的和无源的,都一起制作在一块单晶硅片上。单片电路适宜于大批量生产,而混合型是比较适宜于小量生产的特殊用途电路结构。

最初,元件偏差过大和可通用的结构单元数量有限等问题似乎限制了集成单片在模拟电路中的应用。然而,很明显,随着某些工艺的精心改进和更合理地利用互补晶体管、配对无源元件等技术,单片结构不仅可以同混合型相竞争,而且可以与用分立元件装

配的常规电路相匹敌。从六十年代中期开始，单片技术经历了一个迅猛发展的过程，开始是象差动放大器这样的单级电路的集成化，然后是较少级组合的集成化，最后到实现具有满意的端子参数的多级模拟电路的集成化。这样一些先进的器件可以分成两类：

——通用电路，它们能够以不同的方式工作，应用于较复杂的系统结构；

——功能电路，它们能够实现整个系统或一个较大的分系统的全部功能。

对于后一类电路，系统设计师的相当重要的一部分工作已由集成电路设计师承担，以致使用者通常免除了进一步的设计工作。

目前，已经研制成功的功能电路仅局限在消费电子学领域应用。在电信、工业电子学、测量和控制领域里，通用电路占统治地位。这类电路中运算放大器和模拟乘法器是基本的、实用的和重要的。运算放大器在数不清的线性和非线性应用中，作为基本的积木式部件是很有用的。由于大量生产与大量使用幸好是一致的，所以它们在最近几年获得了大规模的发展。模拟乘法器主要用于非线性场合。虽然它们不象运算放大器那样普及，但仍然是很重要的。

鉴于模拟集成电路这一课题的复杂性，本书的内容只涉及上面提到的两种电路。之所以选择它们，不仅因为它们在各种各样的应用中是最基本和最有用的类型，而且还由于作为设计者的职责来说，两者都需要进行新的探讨，这就是本书的主要目的。

本书第二章和第三章概括了主要的单片集成电路技术和晶体管电路分析，紧接着在第四章讨论了基本的线性集成电路结构单元。第五章和第八章对运算放大器和模拟乘法器进行了总的描述，并且详细叙述了部分具有代表性的商品通用型产品。第六章、

第七章和第九章涉及运算放大器和模拟乘法器的应用。本书在内容处理上始终考虑以单元电路为思路,而不是以级为思路,同时已经考虑到目前工程师们设计的是较大的功能块而不是常规的局部电路。作者希望,通过范围相当广泛的实际例子,这个新的基本原理的阐述将为今后成功地解决本书没有提到的设计课题打下坚实的基础。

第二章 单片集成电路技术

单片集成电路技术是从外延平面晶体管技术发展而来的。后者是先在重掺杂的 N^+ 衬底上生长 N 型外延层，然后采用平面扩散形成分立晶体管(见图 2.1)。重掺杂使得衬底导电性高，从而形成小的集电极体电阻。外延层仅为低掺杂，以便提供高的集电极-基极击穿电压和小的集电极-基极电容。它的基本工艺流程是，首先在外延层中扩散 P 型基区，然后扩散 N^+ 型发射区。两次扩散都是通过二氧化硅覆盖层中的光刻窗口来实现的。最后将晶片切开成各自独立的器件并封装在外壳里。

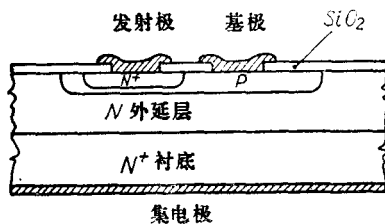


图 2.1 硅平面外延晶体管的剖面图

2.1 NPN 晶体管

集成 NPN 晶体管的制造与分立晶体管的制造非常相似。主要的差别在于，集成电路的晶体管和其它组成元件共用一块衬底，而不是切开成各自独立的器件。因此，集成电路本身的结构就必须对各种元件提供某种绝缘。目前已经研制成功许多隔离方法，其中用 PN 结隔离是最经济的，因而被最广泛地采纳。这种方法是利用 P 型材料包围 N 型集电区，并且工作时使这个 PN 结保持反向

偏置。

在实际制作过程中,第一步是在 P 型衬底上生长 N 型外延层。 N 型外延层的杂质浓度是这样来选择的,即要使得集电极-基极击穿电压处在 $40\sim 100$ 伏的范围内。第二步就是形成 N 型隔离岛。它是通过在外延层中扩散 P 型槽来实现的(见图 2.2)。在隔离岛

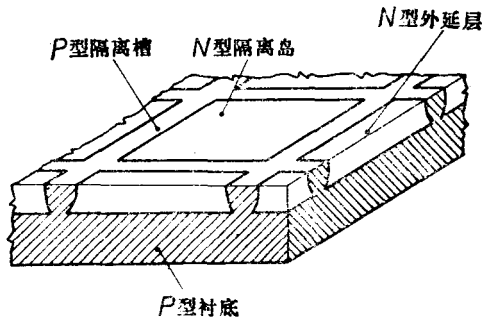


图 2.2 P 型衬底中的 N 型隔离岛

里,再通过两次扩散就能形成 NPN 晶体管(见图 2.3 和本章的引言)。图 2-4 表示 NPN 晶体管的典型杂质分布。由图可见,发射

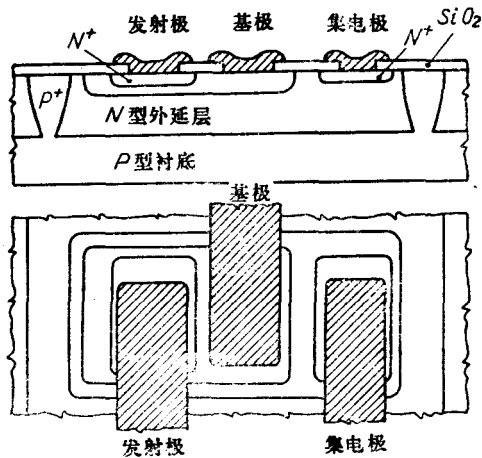


图 2.3 用 PN 结隔离的集成晶体管

区的杂质浓度比集电区要高好几倍。因此，发射极-基极击穿电压比集电极-基极击穿电压就要低得多。 BV_{EBO} 的典型范围是 6~7 伏。

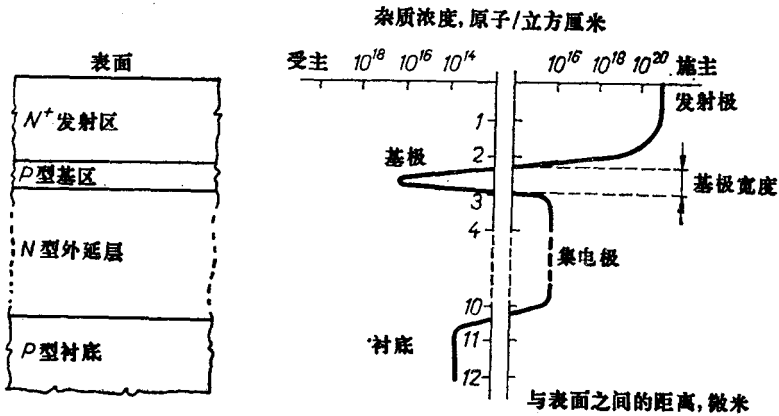


图 2.4 NPN 晶体管的典型杂质分布

使衬底保持为电路中最负的电位(负电源电压)，隔离 PN 结就相当于反向偏置的二极管(见图 2.5)。每一个隔离岛都被两个串接的二极管分开。通过这种二极管的漏电流非常小，通常不会影响隔离岛中包含的电路。二极管电阻的影响也一样，由于每一个都大约有一百兆欧，故它们与集成电路设计中的常用电阻相比就可以忽略。

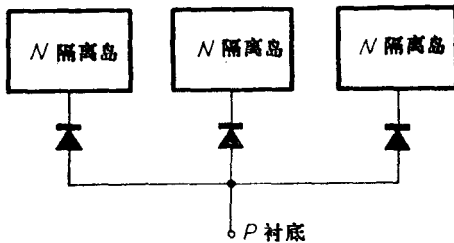


图 2.5 利用反偏 PN 结绝缘的隔离岛模型

与二极管反向电阻和漏电流不同的是，~~二极管电容对制作的~~电路有明显的影
响，如影响它们的高频性能与~~有关速度~~。这种集电极-衬底电容是跨接在隔离岛底部与侧面的寄生电容的总和。由于集电极和衬底两个区域都是轻掺杂且它们的结是突变的，就底部分量而言，每单位面积的电容就偏小。但另一方面，底部面积相对地大些。侧面分量却相反：由于侧面的扩散为重掺杂，致使每单位面积的电容要大些，但是面积小一些。由于这些原因，使得底部与侧面的寄生电容约处在相同的数量级。将电路设计得较小，以便能够嵌进较小的隔离岛里，就能使总电容减小。

总的集电极-衬底电容还与 PN 结的反向偏置有一定的关系。它的底部分量及侧面分量分别与反向电压的平方根和立方根成反比。之所以出现这种差别，原因在于底部的结是突变的，而侧面的结却接近线性。

由于存在隔离结，集成晶体管实际上就是一个四层结构。这里的基区和集电区加到衬底上就形成了一个附加的寄生 PNP 晶体管(见图 2.4)。但通过选择电位条件就能保证这种寄生晶体管总是截止的，在这种情况下它的影响通常就可以忽略。

集成晶体管与分立晶体管之间的最大差别可以归纳为下列两个方面：

a) 由于集电极接点位于结构的顶部，集电极电流的载流子越过的路径就长。况且，集电区是用高阻材料做成的，并且截面积小。因此，与可以比拟的分立器件的相应参数相比，集成晶体管的集电极分布电阻与饱和压降就要高一些，并且它的频率响应更加受到限制。

b) 由于隔离 PN 结形成的容性集电极负载而进一步限制了频率响应。

减小集电极体电阻的有效办法是，在外延生长之前，先在 P 型