

集成运算放大器

原理与应用

李清泉 黄昌宁 编著



科学出版社

73.871
249

集成运算放大器

原理与应用

李清泉 黄昌宁 编著

科学出版社

1980

DT01/4

内 容 简 介

本书共十章,前四章着重介绍集成运算放大器的电路原理,内容包括集成电路元件,单元电路,典型电路分析,以及电路应用中的一些问题;后六章着重介绍集成运算放大器在自动控制,自动测量,以及模拟数字混合计算技术领域中的应用,包括信号运算电路,信号处理电路,信号发生器,信号变换电路,测量电路,以及有源校正电路和调节器等内容。书中附有一定数量的习题。

本书对集成运算放大器的电路原理及其应用中所涉及的基本概念,基本原理和基本分析方法作了比较深入的讨论,并介绍了一批工程实用电路。

本书可作为大学自动控制或相近专业的教材,也可供从事模拟数字混合计算技术,自动控制和自动测量的工人和技术人员参考。

集成运算放大器

原理与应用

李清泉 黄昌宁 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年2月第一版 开本:787×1092 1/16

1980年2月第一次印刷 印张:33 1/4

印数:0001—38,630 字数:774,000

统一书号:15031·248

本社书号:1512·15-7

定价: 3.40 元

前 言

运算放大器原先是电子模拟计算机的一种基本部件，它本质上是一种高增益的直流放大器，在外部反馈网络的配合下，它的输出与输入电压(或电流)之间可以灵活地实现各种特定的函数关系，因而具有对不同信号进行组合、运算和处理等多种引人注目的功能。

六十年代以来，运算放大器从电子管到晶体管，又从晶体管分立元件发展到目前的单片集成电路，不论是生产工艺还是电路设计水平都经历了飞跃的发展。和早期的分立元件运算放大器相比，集成运算放大器具有以下几个明显的优点：

- (1) 运算放大器的体积和功耗已经减小到只相当于一个小功率晶体管；
- (2) 由于外部连线和焊点减少，运算放大器的可靠性大大提高；
- (3) 由于集成电路中相邻元件(如晶体管、电阻等)的电参数匹配优良，运算放大器的零点漂移和共模抑制比等直流参数得到改善。

总而言之，集成运算放大器的出现，使电路设计人员从此摆脱了制作一般放大器所必需的从电路设计、元件选配直到组装调整的繁重负担，现在集成运算放大器已经作为一种商品可供设计人员直接选用了。这种技术上的深刻变化，使得运算放大器的应用领域早已超越了电子模拟计算机的范畴，如果今天我们说运算放大器的应用遍及自动控制、自动测量、计算技术、电信和无线电等几乎一切技术领域是一点也不算夸张的，不仅如此，集成运算放大器的普遍应用，已经使某些领域的面貌为之一新。举例来说，在反馈控制系统中校正装置的设计和实现始终是一个关键性的问题，过去大多数都采用无源校正，而且通常都必须为每一个控制系统专门设计一种特定参数的校正装置。自从广泛采用集成运算放大器后，设计人员就可以利用参数适应范围极为宽阔的各种通用的有源校正装置来改善系统的稳定性和品质。这种变化无疑是广大设计人员所欢迎的。

本书的内容大致可分为两部分。前一部分着重介绍集成运算放大器的电路原理，后一部分介绍它的各种应用。

第一部分由前四章组成。第一章介绍集成化元件的结构和特性。第二章分析了组成运算放大器的四种单元电路——差动输入级、中间级、输出级和电流源电路。第三章介绍了第一代到第四代集成运算放大器的典型电路，了解这些典型电路的原理和特性，可以为合理地设计各种运算放大器的应用电路打下良好的基础。第四章讨论了集成运算放大器的参数测试、相位补偿和性能扩展问题。其中的相位补偿问题乃是应用技术中一个极其重要的问题。

本书的第二部分由第五章到第十章组成，这里介绍了集成运算放大器在各种技术领域中的应用情况，它们分别是：信号运算电路，信号处理电路，信号发生电路，信号变换电路，测量电路，以及有源校正电路和调节器。尽管运算放大器的应用电路形式繁多、变化无穷，但它们的基本组态只有三种，即反相运用、同相运用和差动运用；它们的基本分析工具则是运算放大器的理想模型。这些基本内容集中反映在第五章的前四节中，它们尤如一把钥匙，对于解决运算放大器各种应用电路的分析计算来说是必不可少的。此外，在第

五章中还系统地阐述了运算放大器在反相、同相和差动运用中的运算误差,这对于运算精度有特定要求的电路设计人员来说无疑也是重要的。

为了努力反映国内外的先进水平和研究成果,本书的篇幅是比较大的,其中有些内容在国内同类书刊中还是首次发表,如果它能对我国集成运算放大器的普及和推广应用作出微薄的贡献,我们就十分欣慰了。

从大学有关专业的教学要求来看,第二到第五章可作为基本教学内容,其余各章的内容则可视各专业的特点加以选用或参考。

由于我们的学识有限,书中肯定存在不少缺点错误,期待着读者批评指正。

笔 者

1979年元旦于清华大学

目 录

前言

第一章 集成化元件的结构和特性	1
第一节 隔离技术	1
一、PN 结隔离	1
二、介质隔离	3
第二节 集成化晶体管	4
一、NPN 晶体管	4
二、PNP 晶体管	6
三、多极晶体管	7
第三节 集成化的无源元件	8
一、二极管	9
二、稳压管	10
三、电阻	10
四、电容	11
第四节 特殊器件	12
一、超 β 晶体管	13
二、结型场效应晶体管	13
三、MOS型场效应晶体管	14
四、高频晶体管	15
小结	16
第二章 集成运算放大器的单元电路	17
第一节 模拟集成电路的主要设计思想	17
第二节 差动输入级	18
一、差动放大器的基本原理	18
二、差动放大器的失调和漂移	22
三、差动放大器的某些特殊电路	26
第三节 中间级	32
一、有源负载放大器	32
二、双端-单端转换	38
三、直流电平移动	39
第四节 输出级	41
一、单管输出级的缺点	41
二、推挽输出级	43
三、输出级的过载保护	44
第五节 电流源及其偏置电路	45

一、电流源的基本电路	45
二、电流源精度的提高	47
三、小电流的电流源	48
四、场效应管偏置电路	52
第三章 集成运算放大器的典型电路	53
第一节 集成运算放大器的第一代电路	53
一、5G23	54
二、FC3	58
第二节 集成运算放大器的第二代电路	63
一、BG305	63
二、5G24	67
第三节 集成运算放大器的第三代电路	71
第四节 第四代——斩波器稳零集成运算放大器	75
一、分立元件的斩波稳零放大器	75
二、动态校零放大器	76
三、HA2900 斩波器稳零集成运算放大器	77
第五节 其他类型的集成运算放大器	82
一、采用基片温度调节措施的低漂移型集成运算放大器 $\mu A727$	82
二、采用结型场效应管的高输入阻抗型集成运算放大器 $\mu A740C$	82
三、低功耗型集成运算放大器 XFC75-0	85
四、集成电压跟随器 LM110	86
五、集成电压比较器 BG307	89
第四章 几个应用中的问题	100
第一节 参数测试	100
一、集成运算放大器的粗测	100
二、主要参数的测试方法	102
三、利用辅助放大器的测试方法	117
第二节 相位补偿	124
一、负反馈放大器的稳定条件	124
二、滞后补偿	129
三、超前补偿	136
四、滞后-超前补偿	138
五、正馈补偿	143
第三节 性能扩展	144
一、减小失调漂移	144
二、提高输入电阻	145
三、增大输出电流	146
四、增大输出电压的摆幅	146
第五章 信号运算电路	149
第一节 运算放大器的基本性质	149
一、运算放大器的图形符号	149

二、集成运算放大器的基本性质	150
三、分析应用电路的两条重要结论	152
第二节 反相运算放大器	153
一、反相比例运算放大器	153
二、反相加法运算放大器	155
三、反相运算放大器	156
四、反相运算放大器的性能扩展	157
五、反相运算放大器的运算误差	161
六、反相比例运算放大器的参数选择	173
第三节 同相运算放大器	182
一、同相比例运算放大器	182
二、电压跟随器	186
三、同相加法运算放大器	187
四、同相运算放大器	187
五、同相运算放大器的堵塞现象及其预防	188
六、同相运算放大器的运算误差	189
第四节 差动运算放大器	196
一、基本差动运算放大器	196
二、高输入阻抗差动运算放大器	202
三、高共模抑制差动运算放大器	210
四、增益线性调节的差动运算放大器	213
五、高共模输入差动运算放大器	214
第五节 积分和微分运算放大器	218
一、基本积分运算放大器	218
二、其他形式的积分运算放大器	220
三、积分器的运算误差和参数选择	222
四、基本微分运算放大器	230
五、其他形式的微分运算放大器	237
第六节 对数和反对数运算放大器	239
一、对数运算放大器	239
二、反对数运算放大器	243
第七节 乘法和除法运算放大器	246
一、乘法运算放大器	246
二、除法运算放大器	247
三、乘-除运算放大器	248
第六章 信号处理电路	252
第一节 RC 有源滤波器	252
一、低通滤波器	252
二、高通滤波器	259
三、带通滤波器	262
四、带阻滤波器	266
五、移相滤波器	269

第二节	精密二极管电路	274
一、	线性检波和绝对值电路	274
二、	限幅电路	282
三、	死区电路	288
第三节	电压比较器	291
一、	单限比较器	292
二、	迟滞比较器	299
三、	双限比较器	308
第四节	采样-保持电路	314
一、	采样-保持电路的基本性质和要求	314
二、	反相型采样-保持电路	317
三、	同相型采样-保持电路	319
四、	峰值检波器	322
第七章	信号发生电路	327
第一节	正弦波发生器	327
一、	正弦波发生器的振荡条件	327
二、	文氏电桥正弦波发生器	328
三、	移相式正弦波发生器	338
四、	T型选频网络正弦波发生器	342
五、	积分式正弦波发生器	347
六、	间接式正弦波发生器	352
第二节	方波和三角波发生器	358
一、	方波发生器	358
二、	方波和三角波发生器	360
第三节	脉冲和锯齿波发生器	365
一、	脉冲发生器	365
二、	脉冲和锯齿波发生器	368
第四节	阶梯波发生器	371
第八章	信号变换电路	374
第一节	数-模变换电路	374
第二节	电压-频率变换电路	377
一、	压-频变换电路的性能规范	377
二、	压控振荡器	378
三、	压-频变换器	385
四、	压-频变换器的应用	400
第三节	电压-时间模-数变换器	407
一、	单斜坡模-数变换器	407
二、	双斜坡模-数变换器	413
第九章	信号测量电路	425
第一节	模拟电表电路	425
一、	直流电压表电路	425

二、直流电流表电路	427
三、交流电压表电路	429
四、交流电流表电路	431
五、电阻表电路	432
第二节 数字式电表	434
一、数字式直流电压表	434
二、数字式交流电压表	450
三、数字式电阻表	453
第三节 其他电参数的测量电路	454
一、电容量的测量	454
二、相位的测量	456
三、频率的测量	462
四、功率因数的测量	463
五、晶体管特性曲线族图示仪	465
第十章 有源校正和调节器	471
第一节 比例-积分校正	471
一、基本特性	471
二、比例-积分校正电路	472
三、其他形式的比例-积分校正电路	475
第二节 比例-微分校正	477
一、基本特性	477
二、比例-微分校正电路	479
第三节 比例-积分-微分校正	482
一、基本特性	482
二、比例-积分-微分校正电路	484
三、基型调节器产品介绍	489
第四节 特种调节器	496
一、双位调节器	496
二、间歇调节器	498
三、前馈调节器	499
四、非线性调节器	499
本书符号说明	502
本书部分习题答案	510

第一章 集成化元件的结构和特性

集成电路是六十年代初期发展起来的一种新型电子器件，它采用与硅平面晶体管相似的掩模光刻、扩散、外延等生产工艺，把晶体管、二极管、电阻、电容等元件和它们之间的连接线等整个电路集成在一块半导体基片上，封装于一个外壳内，构成一个完整的、具有一定功能的电路，所以又称为固体组件。和传统的分立元件电路相比，集成电路的元件密度大大提高，体积小，重量轻，进一步推动了电子设备的微型化过程；同时由于外部焊点大大减少，互连线缩短，从而也大大提高了设备的可靠性。

然而采用集成电路工艺制造的晶体管、电阻、电容等元件不仅参数的离散性很大，而且PN结的反向击穿电压低、参数范围窄、温度系数又大，在这些方面它们通常是竞争不过廉价的分立元件的。所以集成化技术最先只能在数字逻辑电路(如DTL, TTL电路)中获得广泛应用，因为在逻辑电路中晶体管工作在“开”、“关”状态下，对元件参数的精确性并无严格要求。

近年来集成工艺经历了飞跃的发展，并且革新了电路的设计思想，主要是充分利用同一块集成电路上相邻元件的参数所固有的匹配性能，广泛采用差动电路的结构形式，从而使电路的偏置和其他性能主要取决于元件参数的匹配程度而极少依赖于参数值本身。这才使得像运算放大器等原先很难制造的模拟集成电路也获得了大批量生产的条件。

为了深入掌握集成电路的特点，有必要粗浅地了解一下集成化元件的构造和性能。

第一节 隔离技术

由于集成电路中所有的元件都必须制作在同一块硅片上，所以为了保证电路的性能，就必须在各个元件之间实行有效的绝缘隔离。目前在集成工艺中通常采用的隔离技术有两种：一种叫PN结隔离，另一种叫介质隔离。下面分别讨论这两种隔离技术。

一、PN结隔离

在集成电路中利用PN结隔离是最常用的隔离方法。我们知道反向偏置的PN结具有很高的反向电阻，因此除了元件的顶部表面是靠生长在整个硅片表面的氧化层(SiO_2)来实现隔离以外，将元件所在的P区和N区四周全部用反向偏置的PN结包围起来，便可以对制作在同一块硅片上的各个元件之间实现绝缘隔离。

对一个P型硅晶片实行PN结隔离的工艺程序可以用图1-1来说明。第一步是将具有氧化层的P型硅晶片(又名衬底)通过第一次光刻，在准备制作NPN晶体管的部位上去除表面氧化层，并进行一次低电阻率的N型杂质扩散，由此产生的 N^+ 区称为隐埋层。关于这个隐埋层的用途，在以后介绍NPN晶体管的结构时再具体解释。第二步，去除整

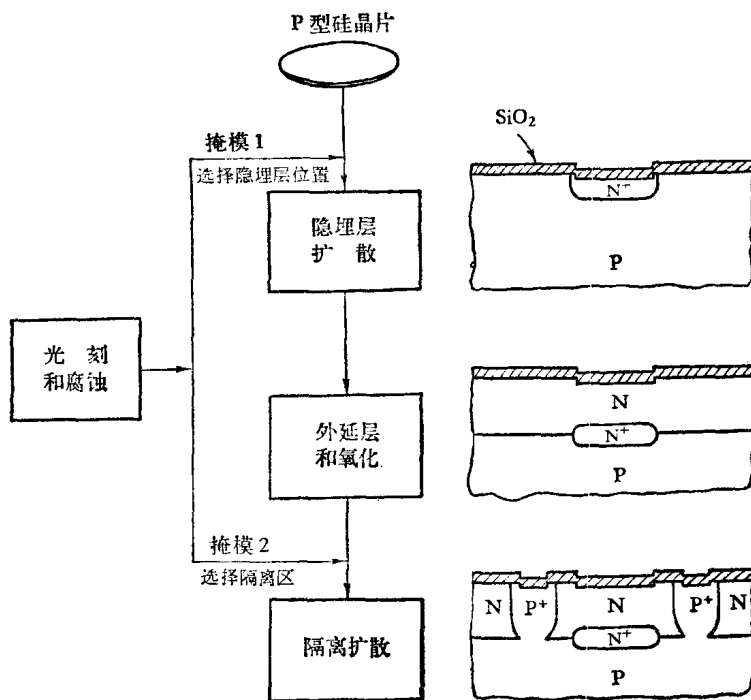


图 1-1 硅晶片进行 PN 结隔离的工艺程序和相应的断面图

个硅晶片表面的氧化层，通过外延工艺在整个晶片表面生长一层 N 型单晶硅，随后再次对表面进行氧化处理。第三步，对事先选择好的隔离区进行第二次光刻，以便除去隔离区表面的氧化层，随后通过表面氧化层的这些窗口进行一次高浓度的 P 型杂质扩散，扩散的深度必须大于 N 型外延层而一直达到 P 型衬底。这样就完成了一个 PN 结隔离的完整工艺。

由于 P 型衬底和隔离扩散所产生的 P⁺ 区都是 P 型硅材料，由它们构成的一个整体把硅片上准备制作各种元件的 N 区分割成为一个一个孤立的小岛。在集成电路通电工作时，必须将上述起隔离作用的 P 型区接到电源电位最低的一端，以保证它相对于这个 P 型衬底上所有的岛状 N 区都是反向偏置的。

很显然，PN 结隔离技术不可能达到真正的电绝缘。首先反向偏置的 PN 结会产生寄生电容，其电容量的典型值大约为 0.06 pF/mil²*。其次是 PN 结的反向电流，在 25°C 时它的典型值约为 1pA/mil²，并且和其他硅平面晶体管一样，每当温度升高 10°C 时这个反向电流大约增长一倍。

除了寄生电容和反向电流以外，PN 结隔离工艺还可能产生某些寄生的有源元件。例如用作隔离区的 PN 结连同岛状 N 区内部的其他 PN 结将构成寄生的 PNP 和 PNPN（即可控硅整流器）器件。因此在集成电路的设计中必须注意提防这些寄生的有源元件，以免它们损害电路的性能。

* mil (密耳)是半导体工艺中常用的一种长度单位。1mil = 10⁻³in. (英寸) = 2.54 × 10⁻³cm(厘米) = 25.4μ(微米)。

二、介质隔离

采用介质隔离技术可以改善或消除 PN 结隔离所固有的许多弊病。图 1-2 介绍了介质隔离技术的工艺流程,其步骤如下:

- (a) 在准备好的 N 型硅单晶的基片上,利用扩散或外延工艺制作一个 N^+ 隐埋层;
- (b) 氧化。在 N^+ 隐埋层的表面生长一层二氧化硅保护层;
- (c) 光刻。在需要隔离的部位除去表面氧化层形成窗口;

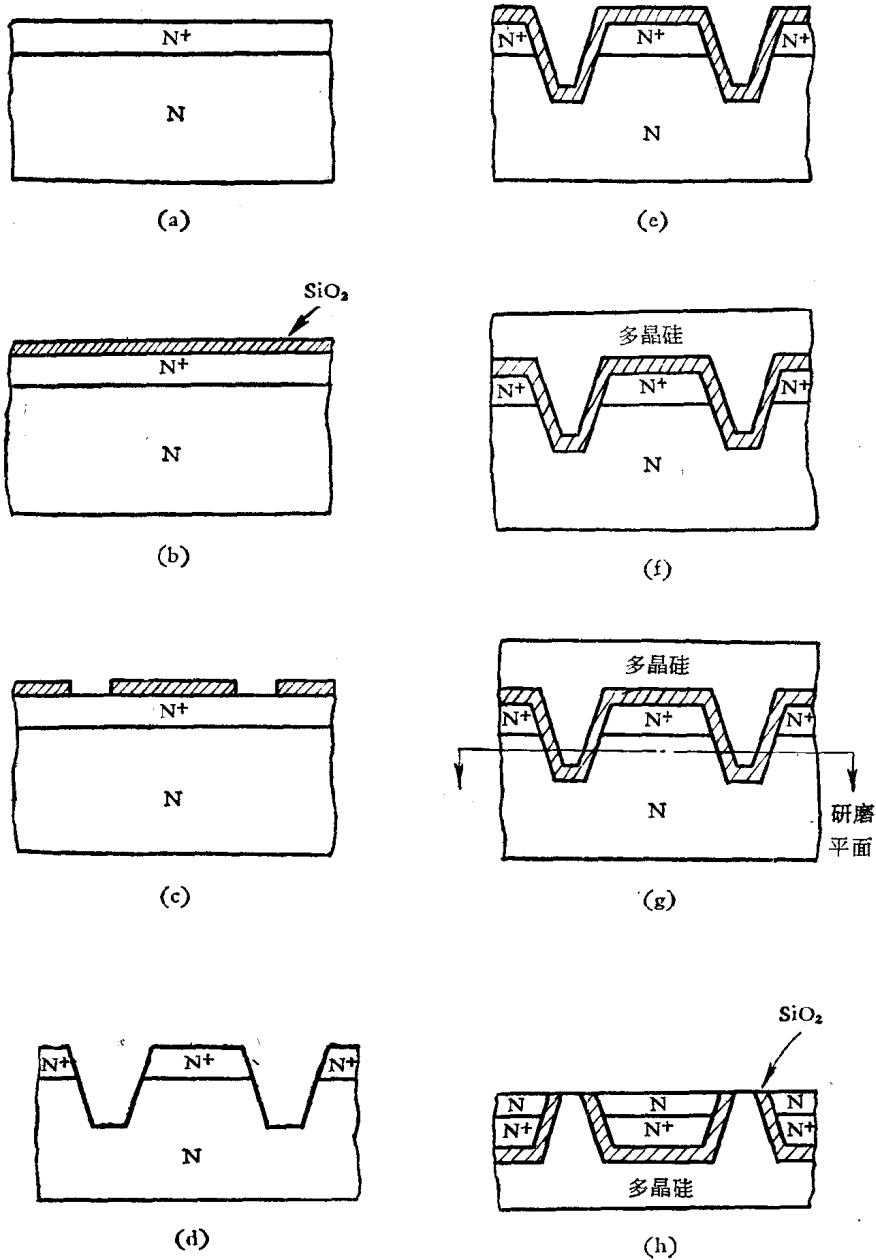


图 1-2 介质隔离的工艺流程

(a)制作 N^+ 隐埋层; (b)生长氧化层; (c)光刻隔离区的窗口; (d)用腐蚀方法形成隔离壕沟; (e)再次氧化; (f)淀积多晶硅; (g)背面研磨抛光; (h)完成后的断面图。

(d) 腐蚀。通过窗口对硅材料进行腐蚀形成隔离壕沟，壕沟的深度应超过最终所需的岛状N区的厚度；

(e) 再次氧化；

(f) 外延。在表面氧化层上淀积一层多晶硅，这个多晶硅层就是未来的衬底；

(g) 研磨。对N型基片的背面进行研磨抛光，直到将隔离壕沟的底部全部暴露出来为止。

图 1-2 (h) 表示介质隔离工艺全部完成以后的断面图。它说明整个薄片以多晶硅层为衬底，而每一个准备制作元件的岛状N区都被电绝缘良好的氧化层四周包围起来。和PN结隔离技术不同，氧化层隔离不需要外加一定的偏置电压，并且不再存在寄生的有源器件，这是介质隔离技术的最大优点。但是在介质隔离的集成电路中仍然存在典型值为 $0.02\text{pF}/\text{mil}^2$ 的寄生电容，并且通过氧化层在岛状N区和多晶硅衬底之间也将产生一定的漏电流，在 25°C 时这个漏电流约为 1pA ，在极限温度 150°C 时大约达到 10pA 。由于这种漏电流不是由反向PN结形成的，所以它不象在PN结隔离的电路中那样随着温度每升高 10°C 就增长一倍。

介质隔离技术的缺点是增加了旷时费资的研磨工序，并且在后续的工艺中往往要使多晶硅长时间处于高温状态，容易引起多晶硅沾污单晶硅的问题。此外，为了保证外延生长的多晶硅填满隔离壕沟，壕沟要有一定的宽度，这就势必减小了硅片的有效利用面积。

第二节 集成化晶体管

一、NPN 晶体管

在组成一个运算放大器的各种元件中，NPN 晶体管不仅数量最多，而且它的质量对放大器性能的影响也最大。因此在集成工艺中，NPN 晶体管的生产工艺必须予以足够的重视，其他集成元件的生产工艺通常只处于从属的地位。

采用PN结隔离的NPN晶体管的一个典型的生产工艺流程可以用图 1-3 来说明。第一步是利用光刻技术在选择好的基区位置上除去表面氧化层形成窗口，继而进行一次P型杂质的扩散，形成P型基区。扩散后表面再次氧化。第二步，再次光刻，在选择好的发射区及集电极引出部位上除去氧化层形成窗口，然后进行一次高浓度的N型杂质扩散，形成发射区和集电极的引出部位。扩散后表面再次氧化。第三步，第三次光刻，在晶体管各电极的引出部位上除去氧化层形成窗口，采用金属化(例如蒸铝)工艺，在电极的引出部位形成欧姆接触，但同时使硅片的整个表面都覆盖上一层铝箔。这些不在电极引出部位的铝箔通过第四次光刻腐蚀加以清除后，就完成了整个NPN晶体管的生产过程。

集成化的NPN晶体管和分立元件的NPN平面型晶体管具有基本相同的工艺结构，不同的是：

(1) 由于集成化晶体管和其他许多器件是制作在同一块硅片上的，因此这些元件相互之间以及它们同公共的衬底之间均存在着寄生参数的影响，在采用PN结隔离的情况下这种影响更其突出。这些因素造成集成化晶体管的高频性能下降。分立元件的晶体管则不存在这种不利的影晌。

(2) 如图 1-4 所示，在分立元件的NPN晶体管中，电子流从发射极径直往下流向集

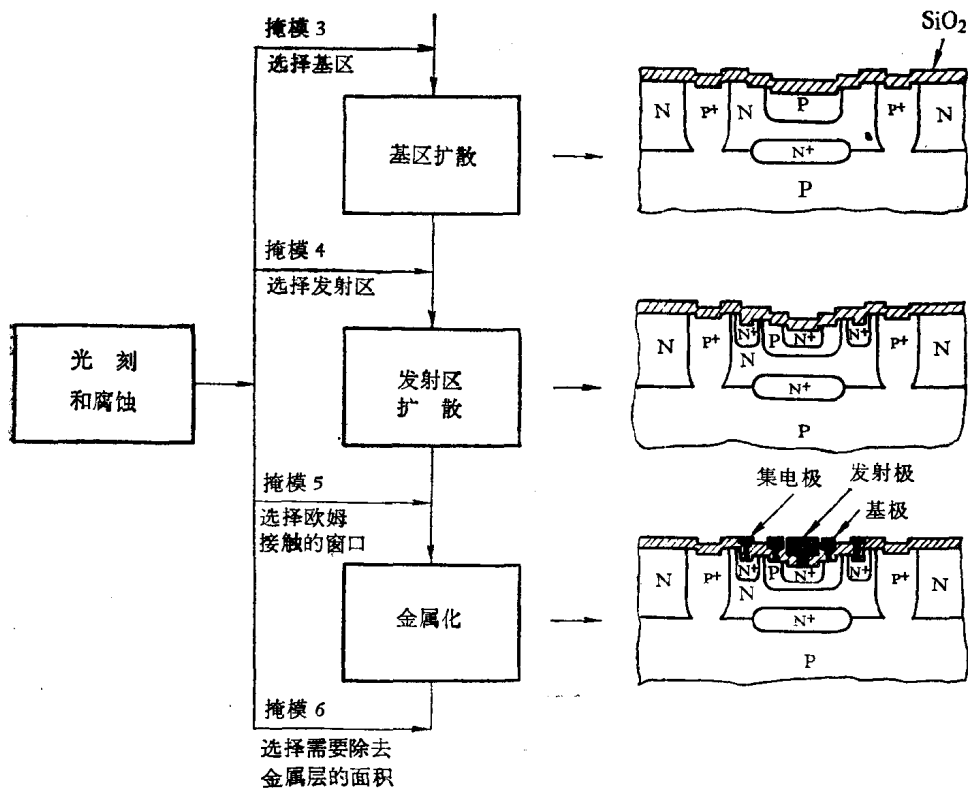


图 1-3 采用 PN 结隔离的 NPN 晶体管工艺流程

电极；而在集成化的 NPN 晶体管中，为了便于在器件之间相互连线，集电极必须在发射极的同一侧引出，因此电子流的通路延长，造成集电区的等效串联电阻增大。这种结构特点反映在外部特性上，就使得集成化晶体管的饱和电阻值以及集电极功耗增大。这个缺点可以通过 N^+ 隐埋层得到部分改善，由于 N^+ 隐埋层具有比 N 型集电区低得多的电阻率，从而可以使电子流在侧向通过集电区时的等效电阻大大减小。这也就是设置 N^+ 隐埋层的目的。

(3) 由于工艺条件完全相同，在同一块衬底材料上制作的相邻的晶体管往往具有精

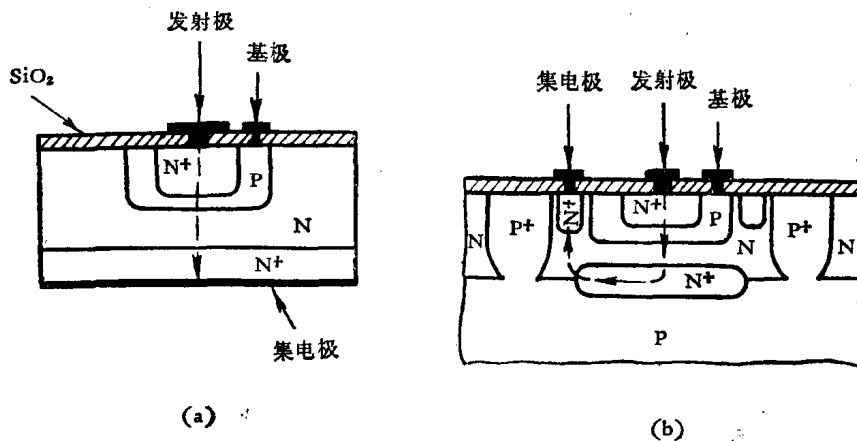


图 1-4 NPN 晶体管
(a) 分立元件的 NPN 管；(b) 集成化的 NPN 晶体管。

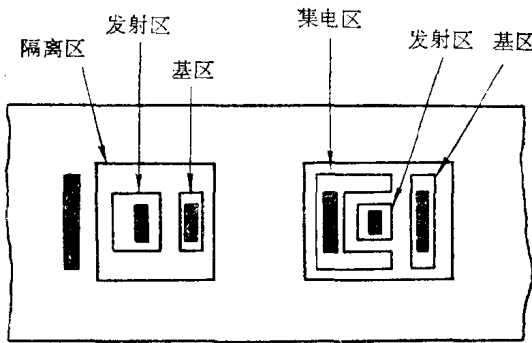
确的匹配特性,例如 β 的偏差小于 $\pm 10\%$, U_{be} 的偏差小于 $\pm 2\text{mV}$ 等等。此外,利用集成电路制作 200pF 以上的电容或 $20\text{k}\Omega$ 以上的电阻通常比制作一个普通晶体管占用更大的硅片面积,成本更高。所以在集成运算放大器的电路设计中应充分利用集成化晶体管的匹配性能,并尽可能用晶体管取代电路中的电阻、电容等其他元件。

二、PNP 晶体管

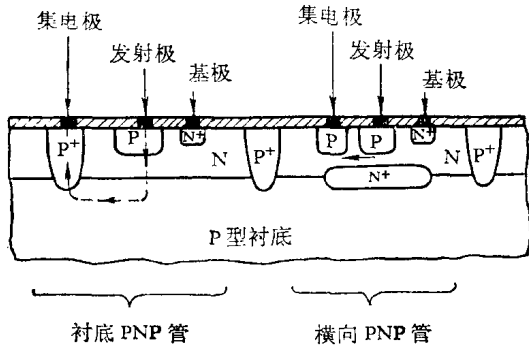
利用生产NPN管的标准工艺,在同一块硅片上制作性能优良的PNP管是比较困难的。因此在早期的集成运算放大器中,无法充分发挥NPN和PNP管互补电路的优越性。随着集成工艺的发展,这个难题获得了部分解决,目前常见的是如图1-5所示的两种PNP晶体管。

1. 衬底 PNP 晶体管

衬底PNP管的结构如图1-5所示。它是以P型衬底作为集电极的,因此只有采用PN结隔离的集成电路中才有可能制作这种结构的PNP晶体管。岛状的N区就是它的基区。在制作NPN管的P型基区时,同时制成了衬底PNP管的发射区。由于载流子是沿着晶体管断面的垂直方向运动的,所以又叫作纵向PNP管。这一点和图1-4所示的NPN管是一样的,换句话说讲,无论是分立元件的还是集成化的NPN管都只有纵向结构。



(a)



(b)

图 1-5 两种集成化 PNP 晶体管

(a) 顶视图(涂黑的面积表示金属电极); (b) 断面图。

的集电区(详见图1-5)。由于它的载流子是沿着断面的水平方向运动的,故得名为横向PNP管。

由于受到掩模光刻工艺水平的限制,横向PNP管集电区与发射区之间的间隔不可能做得太小,所以它的 β 值极低(典型值为3—5),频率特性也很差(f_T 约在 1MHz 左右)。但

根据PN结隔离的要求,衬底PNP管的集电极必须接到电源电位最低的一端,所以它在电路中通常只能作为射极跟随器(即共集电极电路)使用。此外,衬底PNP管的基区(相应于NPN管的集电区)较宽,它的电流放大系数 β 一般小于50,而且高频性能(f_T 约在 10MHz 左右)也比NPN管差。

2. 横向 PNP 晶体管

横向PNP管的P型发射区和集电区是在制作NPN管的P型基区时同时形成的,它的N型基区则对应于NPN管的集电区(详见图1-5)。

它的结构特点使它的 $b-e$ 结和 $b-c$ 结却具有较高的反向击穿电压。在后续的章节中将会看到,在集成运算放大器的电路设计中,巧妙地将普通的 NPN 管和横向 PNP 管接成共射-共基组态或其他复合组态,不仅可以弥补横向 PNP 管 β 低、频响差的缺陷,而且充分发挥了它反向击穿电压高的特长,形成了性能优良的各种放大电路。

与前述的衬底 PNP 管不同,横向 PNP 管是相对独立的器件,它在电路中的组态不受任何限制,所以它比衬底 PNP 管有用得多。

三、多极晶体管

通过上述几种晶体管结构的讨论,不难看出,利用集成工艺,很容易根据电路设计人员的要求制造出多发射极或多集电极的多极晶体管。

例如在图 1-3 所示的 NPN 晶体管的工艺流程中,在进行发射区扩散之前,如果利用光刻技术在氧化层上多开几个窗口,就可以通过 N 型杂质扩散获得多个 N 型发射区。这种器件叫作多发射极 NPN 晶体管,它的通用符号如图 1-6 所示。众所周知,这种多发射极 NPN 管正是 TTL 集成电路中组成与非门的基本元件。

在近代集成运算放大器中还经常采用多集电极的横向 PNP 晶体管。图 1-7(a) 是说

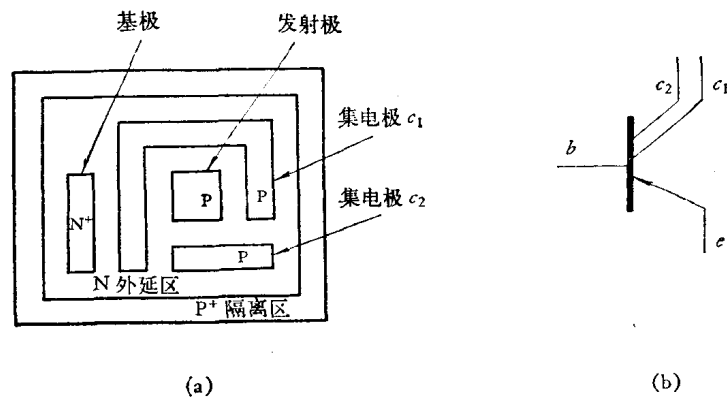


图 1-7 多集电极横向 PNP 晶体管
(a) 顶视图; (b) 图形符号。

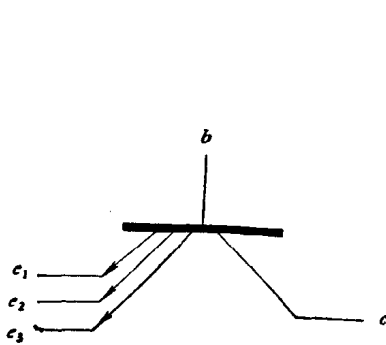


图 1-6 多发射极 NPN 晶体管

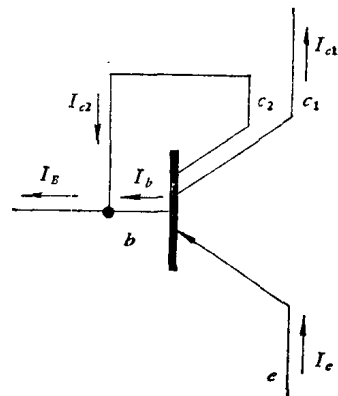


图 1-8 具有内部电流负反馈的横向 PNP 管