

模拟集成电路及其应用

刘辉 编

51.1

安徽科学技术出版社

责任编辑：杨家骝

封面设计：李 服

模拟集成电路及其应用

刘 辉 编

*

安徽科学技术出版社出版

(合肥市跃进路1号)

安徽省新华书店发行 安徽新华印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：5.5 字数：143,000

1984年3月第1版 1984年3月第1次印刷

印数：00,091—17,850

统一书号：15200·39 定价：0.94元

前 言

集成电路自五十年代诞生以来，发展极为迅速。以集成规模来说，已经历过小规模、中规模和大规模集成电路的发展，并已进入了发展超大规模集成电路的新阶段。

集成电路中除了数字集成电路以外，绝大多数是模拟集成电路。它的品种最多，用途最广。因它具有体积小、重量轻、耗电少，性能优良、稳定可靠、价格便宜、使用方便等优点，已广泛应用到现代科学技术与国民经济各个部门。目前模拟集成电路仍在日新月异地发展，应用范围也在迅速扩大。

为了适应我国四化和生产发展的需要，作者编写了《模拟集成电路及其应用》一书。本书首先介绍集成电路的基础知识、模拟集成电路元件的结构和特性、集成单元电路和集成运算放大器；然后介绍模拟集成电路在稳压电源、低频放大器、电影扩音机与电视机电路方面的应用；最后还介绍了集成电路的使用知识。

本书可供中等技术学校电影技术和有关专业电子技术课程教学时参考，也可供从事电影扩音机和电视机生产、维修的工人和技术人员阅读参考。

由于作者水平有限，书中不免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

作 者

1983年5月于合肥

目 录

第一章 集成电路的基础知识	1
1—1 概述	1
1—2 集成电路的分类	2
1—3 集成电路中的元、器件结构和特性	7
1—4 小结	17
第二章 模拟集成电路的基本单元电路	19
2—1 模拟集成电路的种类	19
2—2 直流放大器的工作原理和问题	20
2—3 差分放大器	24
2—4 恒流源电路	39
2—5 有源负载电路	44
2—6 电平位移电路	45
2—7 单端化电路	47
2—8 内部稳压源电路	48
2—9 输出级及其保护电路	50
第三章 集成运算放大器	56
3—1 集成运算放大器的分类及特点	56
3—2 常用集成运算放大器的工作原理简介	58
第四章 集成稳压电源	66
4—1 稳压电源的工作原理	66
4—2 半导体集成稳压电源	69
第五章 集成低频放大器与电影扩音机	80
5—1 集成低频放大器	80
5—2 音频功率放大器的几种程式简介	83
5—3 OTL电路(5G31型)分析	85

5—4	厚膜混合集成电路OCL(HM—7436—DF型)分析	90
5—5	厚膜混合集成电路电影扩音机	95
第六章	电视机集成电路	107
6—1	概述	107
6—2	HA1144集成电路	108
6—3	HA1167集成电路	112
6—4	KC583集成电路	117
6—5	KC581集成电路	122
6—6	HA1166集成电路	127
6—7	KC582集成电路	133
第七章	集成电路的使用知识	138
7—1	集成电路型号命名方法	138
7—2	使用安装中的问题	144
7—3	用万用表粗测集成电路的方法	148

附 录

1.	半导体集成电路的外形和尺寸	156
2.	厚、薄膜电路的外形和尺寸	160
3.	国产5G300系列电视机集成电路图	163

第一章 集成电路的基础知识

1—1 概 述

集成电路是一门新兴技术，近二十年来获得了飞跃的发展，这首先是由于军事、宇航及电子计算机等科学技术发展的需要；另外也由于半导体科学理论和技术的迅速发展、晶体管生产工艺的不断完善，为集成电路的发展提供了坚实的基础。1952年英国的达默(Dummer)首先提出了集成电路的设想。1958年美国得克萨斯仪器公司的基尔比(Kilby)和仙童公司研制成第一批集成电路。1959年美国仙童公司赫尔尼(Hoerni)发明了制造硅平面晶体管的平面工艺，从而完善了集成电路的生产工艺。这就标志着分立元件电路进入了固体化和集成化的时代，因而促进了电子技术不断发展。1965年前后，相继推广使用了小、中规模集成电路，1971年出现了大规模集成电路，近年来又研制成超大规模集成电路。特别是中、大规模集成电路的应用，对空间电子技术和电子计算机的发展起了巨大的作用。例如1946年美国宾州大学莫切利(Johnw. Mauchly)和埃克特(J. Presper Eckert)发明了世界第一台电子计算机(使用一万八千多只电子管，数万只电阻、电容和电感器等，体积三千立方英尺，重卅吨，耗电一百五十瓩，每秒运算速度仅为五千次)。30年来电子计算机已经历了四代的演变，现在同样功能的微型计算机(F—8型)体积缩小了卅万倍，重量减少六万倍，耗电量减少了五万六千倍，而存贮容量还大八倍，可靠性提高了一万倍。

集成电路与分立元件电路相比较，具有体积小、重量轻、高可靠、低功耗、低成本和适合于现代化批量生产等优点。因此，

世界上各个工业先进国家都大力研制和使用集成电路。它现已广泛应用到电子计算机、通讯、广播、电视、雷达、导弹、卫星、工业自动控制以及电子手表等系统中。

我国大约在六十年代初期才开始研制集成电路的。目前，不仅中、小规模集成电路已按系列生产，而且大规模集成电路也已试制成功并成批生产。例如在1981年初我国研制成功十六千位MOS随机存贮器，它是在面积为 3.5×5.9 平方毫米的芯片上，制作有三万七千多个电子元件，它能同时存入一万六千八百三十四位的二进位数据。这为我国研制大型高速计算机创造了良好条件。

现在我国自行设计制造的各种类型的集成电路，已推广应用到电子计算机、国防科研、数字仪表、工业自动控制、通讯、广播电视、电影以及家用电器等等方面。可以预计，随着我国国民经济的发展，集成电路的研制与使用将展示着无限美好的前景。

1—2 集成电路的分类

集成电路还在发展，目前它的定义和分类还不统一。一般认为：在一个(或几个)基片上制作所需的晶体管、二极管、电阻和电容等元器件，并连接成具有特定功能的电路，称为集成电路。它的品种很多，其分类方法，基本上有以下三种。

一、按结构和工艺分类

它可分为四类，即半导体集成电路、膜集成电路、混合集成电路和电子管集成电路。

1. 半导体集成电路

主要是以半导体单晶硅作为芯片，采用了制作硅平面晶体管的平面工艺，把晶体管、二极管、电阻和电容制作在同一芯片上，并相互连接形成特定功能的电路。它是集成电路中发展最快、品种最多、产量最大、应用最广的一种电路。习惯上，人们笼统的讲“集成电路”，大多数是指半导体集成电路。按半导体

集成电路内部的晶体管的类型不同又可分为双极型与单极型两种。

双极型半导体集成电路中的晶体管一般是硅平面 NPN 型三极管。因为这种三极管中，有电子和空穴两种载流子参加导电，所以称为双极型。双极型半导体集成电路的特点是工作速度快、工作频率高，处理讯号延迟时间短，但生产工艺较复杂。

单极型半导体集成电路中的晶体管是一种绝缘栅场效应管，由于它是由金属、氧化物和半导体所组成，所以又可称为金属-氧化物-半导体场效应管，或者简称为 MOS（是 Metal-Oxide-Semiconductor 的缩写）场效应管。因场效应管中只有一种载流子（电子或空穴）参加导电，所以称为单极型。单极型半导体集成电路的特点是制造工艺简单、功耗小、输入阻抗高、易于大规模集成；但工作速度较低、处理讯号延迟时间较长、工作频率较低、带动负载能力小。一般只适用于运算速度不高的计算机、电子手表以及工业控制机等。

2. 膜集成电路

膜集成电路是指构成电路的元件以“膜”的形式淀积在一块绝缘的基片（微晶玻璃或耐热玻璃、抛光陶瓷片等）上而形成的电路。它是厚膜集成电路和薄膜集成电路的总称。由于这种电路中的膜式晶体管工艺尚未成熟，全膜化的集成电路尚在研究阶段，因此，膜集成电路在目前实际上指的是膜混合集成电路。

厚膜（膜厚自一微米到几十微米）集成电路采用丝网印刷法，将各种浆料按元件设计的图形，通过漏网印刷在绝缘基片上，再经烧结、调整等工序制成具有预定性能的膜式元件（导电带、电阻、电容等）。电路所需的晶体管，则由外接硅平面管的芯片而成。此种电路的主要优点是电路设计灵活、元件参数范围广，工艺适应性好，因而生产自由度大，可以多品种、小批量生产。

薄膜（膜厚一微米以下）集成电路，它是在绝缘的基片上，用真空蒸发法和溅射法，将电阻、电容、导电带等材料，按不同的图形及工艺，形成多层薄膜，互相重迭而成膜式电路元件。薄膜

的材料视元件性质而定。例如电阻是用钽、铝、镍铬、铬、氧化锡膜；电容器的介质是二氧化硅薄膜，电容器的极板是用蒸铝薄膜。薄膜电阻一般用直接光刻法，其生产工艺流程是：基片→蒸发电阻膜→蒸发导电带→光刻导电带→光刻电阻膜。薄膜电容一般生产流程是：基片→蒸铝薄膜作下电极→蒸 SiO_2 膜作介质→蒸铝薄膜作上电极。晶体管则为外接硅平面管芯。按电路功能将上述元、器件用铝条通过超声压焊而成薄膜集成电路。薄膜集成电路与同样功能的厚膜电路相比，其特点是元件数值精度高（电阻精度可达0.01%）、频率特性好（可适用于高频、超高频以至微波集成电路）、抗辐射性能好，参数范围也广。

膜集成电路，由于有以上的特点，生产自由度大，可以短周期、多品种、小批量生产；还可以根据各种电子设备的需要，生产出非标准化的电路。例如低频放大设备中，由高精度高阻值的电阻和较大容量的电容组成的线性放大器，就常采用膜集成电路或混合集成电路。

3. 混合集成电路

混合集成电路是由半导体集成电路、膜集成电路、分立元件工艺中的任意两种或三种混合制作的微型电路。它一般有两种结构形式：一种是在基片上用半导体工艺制成晶体管、二极管，再在氧化硅绝缘层上用膜工艺制成薄膜电阻或薄膜电容，最后按功能要求用铝条连接起来，这样的混合集成电路称为单片式混合集成电路。另一种则是把晶体管、二极管制作在一个基片上，而把电阻、电容制作在另一个基片上，最后把它们固定在同一底座上，按功能进行连接，这种混合集成电路称为多片式混合集成电路。有时这种多片式混合集成电路，还要在内部配接分立元件，如超小型电感，外部配接大电阻或大电容器。这种电路的特点是电路形式及元、器件选择比较灵活，可充分利用三种电路的特长，但也由于工艺复杂，生产率不高，因此只适用于组成某些专用的集成电路。

4. 电子管集成电路

电子管集成电路是最近几年开始研制的一种新型集成电路。它是利用电子管原理和半导体集成电路的某些技术制作的。如利用真空溅射和光刻技术，将微型电子管、电阻等元件制作在单块蓝宝石的基片上，其微型电子管用氧化钨作热发射电子的阴极，用钛作板极和栅极。因钛有耐高温等特性，所以这种集成电路可以在较大电流和较大功率下工作。它目前仍在研制阶段。

二、按元、器件的密集程度分类

在集成电路中，如果按电路的复杂程度和元、器件的密集程度的不同，可划分为小规模集成电路 (SSI)、中规模集成电路 (MSI)、大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (ULSI)。目前我国对各种集成电路的划分，基本上如表1—1所示。

表1—1 国产集成电路的规格表

密集程度 种 类	规 模	SSI	MSI	LSI	ULSI
双极型数字电路		10门/片以下	10~100门/片	100~ 10000门/片	10000门/片 以上
MOS—FET		100元件/片 以下	100~ 1000元件/片	1000~ 10000元件/片	100000元件 /片以上
模拟电路		50元件/片 以下	50~ 100元件/片	100~ 10000元件/片	
存 储 器			256位/片以下	256位/片以上	

例如：半导体双极型集成电路，每个单片（面积最大 10~30mm²）上包含门电路一百到一万个的称为大规模集成电路；对于 MOS 集成电路，每一个单片上包含有一千到一万个元件的称为大规模集成电路；对于模拟集成电路每片包含有 50~100 个元件的称为中规模集成电路。超大规模集成电路，它包含门电路或元件数比大规模集成电路高两个数量级，即大一百倍。

三、按电路的功能分类

按照电路的功能又可分为数字集成电路和模拟集成电路。以

下先分别介绍数字电路与模拟电路的一些基本概念。

人们在生活中经常接触到各种各样的“量”，这些量可以归纳为数字量和模拟量。数字量是指有规律的不连续的变化量，模拟量是指连续变化的量。例如：汽车从静止状态(速度为零)加速到最高速度过程是连续变化的，故“速度”称模拟量。而汽车上的乘客人数，则是数字量。但是即使是连续变化的模拟量，为了便于运用和计算也常用数字量来表示。例如“时间”是模拟量，如用数字钟以“秒”为单位来计量，即以秒显示数字，而在一秒内数字不变化。又如“电压”是连续变化的量，如用“毫伏”为单位来计量，那么量出的量就是以毫伏为最小单位作为不连续变化的量。这种将模拟量转化为数字量来表示，称为“量化”。

同样在电子技术中，也常常接触到数字量和模拟量。例如：电讯号中，音频电压是连续变化的音频讯号，故称为模拟讯号；电报的电码、计算机的数码讯号，则是不连续的数字量讯号。这两种不同讯号在处理方法上也是不同的。

数字集成电路是以“开”和“关”两种状态或者以高、低电平对应“1”和“0”二进制数字量，并进行数字运算、存贮、传输和转换的集成电路。它的内部主要是门电路和触发器构成为计数器、存贮器、移位寄存器等各种用途的电路。

数字集成电路按开关速度(平均传输延迟时间)划分，可分为低速(大于50毫微秒)、中速(10~50毫微秒)、高速(2~10毫微秒)和超高速(小于2毫微秒)电路数种。

模拟集成电路就是以电压或电流为模拟量进行放大、转换、调制等用途的集成电路。它一般分为线性和非线性集成电路两大类。

数字集成电路与模拟集成电路相比，前者看来结构复杂，实际上它的电路型式、品种简单，重复单元多；后者看来结构不复杂，但其种类繁多。实际应用时，按需要二者可以互相转换。

微波集成电路是近期发展中提出的，它是指工作频率在300兆赫以上的频段的模拟集成电路。它是采用半导体和膜集成工

艺，在绝缘基片上，将有源、无源元件和微带传输线或与特种微型波导联系成一个整体构成的微波电路。

在微波集成电路中，通过设计与制作使有源的器件连接匹配良好，同时注意频段与电路的特点，有效的应用与考虑无源器件的集总参数和分布参数以至寄生参数的影响。目前广泛使用的微波带线，发展了各种微型特种波导等，以代替散装电路中的同轴线和波导。其优点是避免高精度的机械加工，缩小了电路尺寸，且提高了微波传输特性。

1—3 集成电路中的元、器件结构和特性

集成电路虽然是在分立元件电路的基础上发展起来的，但是由于集成工艺本身的固有特点，使集成电路在组成、结构工艺、元器件的特性等方面与分立元器件有许多不同之处。所以，下面就半导体集成电路中使用的电路元件，按其结构和特性，分别介绍。

一、隔离技术

因集成电路中的元器件制作在同一个硅片上，为保证电路的性能，必须在各元器件之间实行有效的绝缘隔离。目前采用的隔离技术有PN结隔离和介质隔离两种。

1. PN结隔离

这种隔离主要是利用PN结在反向偏置下具有很高电阻的原理制成的。其工艺过程为：

(1)生成氧化层：将圆柱形P型单晶硅，切成厚度约 $400\mu\text{m}$ 的硅片，作为衬底，进行表面研磨抛光，用热氧化法（硅片加热 $1100^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 时让氧气通过硅片）在硅片上生成约 $1\mu\text{m}$ 厚的二氧化硅(SiO_2)薄膜。

(2)第一次光刻：所谓光刻就是利用光刻技术在硅片 SiO_2 薄层上，按设计图形除去一定区域的 SiO_2 层——暴露出硅片“窗口”，具体光刻过程如图1—1所示。首先在 SiO_2 表面上涂上一层

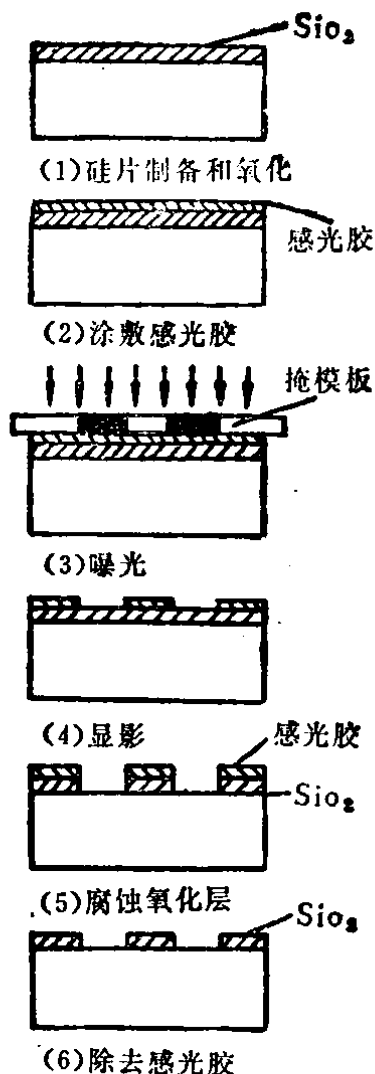


图1—1 光刻工艺过程

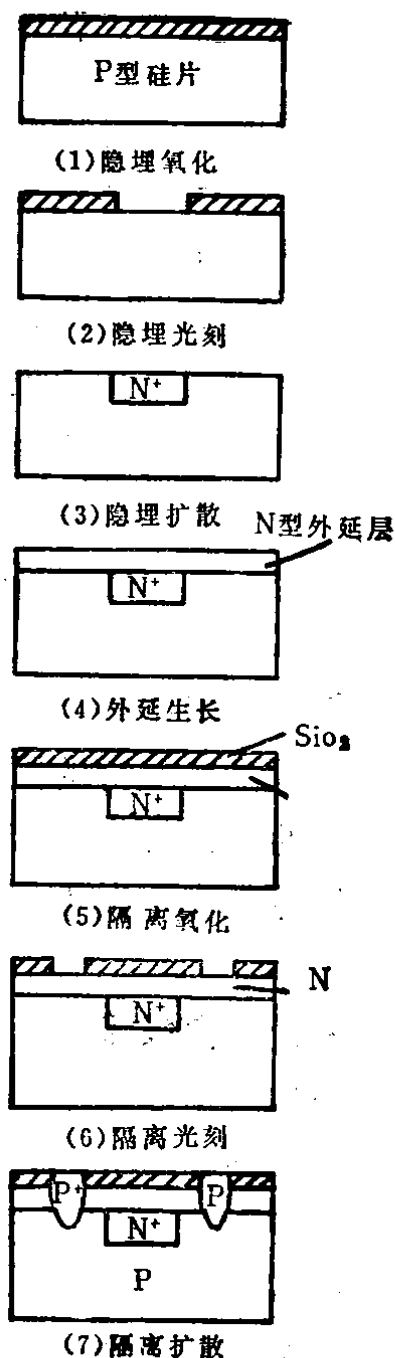


图1—2 PN结隔离工艺过程

感光胶烘干后,放上掩模板(把要刻去的氧化层部分对应模板不透光的部分,保留的部分对应模板透光部分),在紫外线下曝光,然后用显影液把未曝光部分的感光胶洗去,呈现 SiO_2 层,再用氢氟酸腐蚀掉没有感光胶保护的 SiO_2 层,露出硅片。而有感光胶保护的 SiO_2 层,则可保存下来,最后用硫酸去掉其余片面上的感光胶,这样就完成了第一次光刻。

(3) 预氧化扩散: 如图1—2所示。通过窗口进行一次高浓度的N

型杂质(三氧化二锑)扩散,使窗口底上形成一层低电阻率的 N^+ 区称为隐埋层。

(4)外延生长N型外延层:在整个P型衬底上生长一层N型外延层,厚约为 $7\sim 10\mu\text{m}$ 。

(5)隔离氧化:用热氧化法在外延层上,生长一层厚 $1\mu\text{m}$ 的 SiO_2 层。

(6)隔离光刻(二次光刻):用光刻工艺刻出需要进行隔离的扩散窗口。

(7)隔离扩散:通过窗口进行一次高浓度P型杂质(硼)扩散,扩散的深度大于N型外延层,一直到达P型衬底,形成 P^+ 区的隔离槽。这样就完成了PN结的隔离工艺。

由于P型衬底和 P^+ 隔离槽都是P型材料,它构成一个整体,把硅片上准备刻制的各元件的N区分别割成一些孤立的“小岛”。集成电路使用时,必须把P型衬底接到电源电位最低的一端,则P型衬底和每一个N区“小岛”之间构成一个反向偏置的PN结。在两个相邻小岛之间相当于有两个反向偏置的PN结串联,电阻很大,这样使两个小岛上制作的元件达到相互隔离的目的。

PN结工艺简单,适合于大批量生产,是目前集成电路中广泛使用的一种隔离方法。但因PN结不能达到真正的电绝缘,有反向电流,有PN结电容以及可能产生寄生晶体管效应等,影响其工作性能,特别在高频时,这种影响更为严重。因此,采用介质隔离技术,可以改善上述PN结隔离的缺点。

2. 介质隔离

所谓介质隔离,就是利用 SiO_2 的绝缘性能使集成电路中各元件彼此隔离开来。其工艺过程如图1—3所示。

(1)刻槽氧化:在准备好的N型硅单晶片上,生成厚 $1\mu\text{m}$ 的氧化层(即 SiO_2 层)。

(2)隔离槽一次光刻:刻出隔离槽窗口。

(3)刻槽:用氢氟酸和硝酸混合而成的腐蚀液,在窗口位置刻

SiO_2 蚀约 $50\mu\text{m}$ 深的沟槽，然后去掉氧化层。

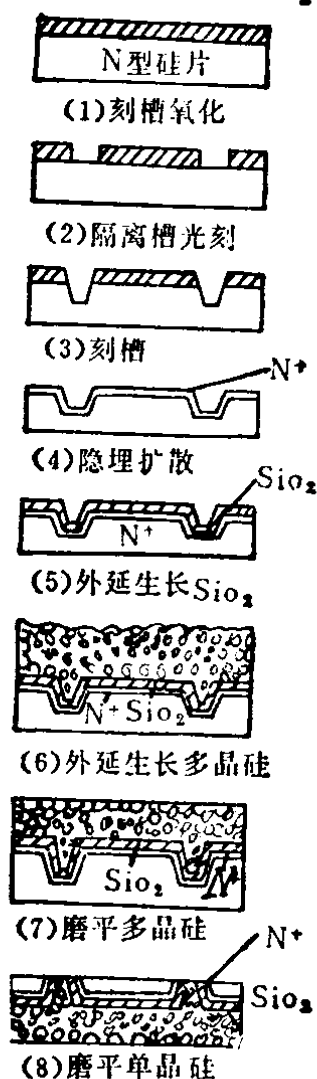


图1—3 介质隔离的工艺过程

(4)隐埋扩散:将刻好槽沟的硅片,进行一次高浓度N型杂质(三氧化二锑)扩散,生长成一层低电阻率的 N^+ 层。

(5)外延生长氧化层:用外延技术在硅表面上生长一层约 $2\mu\text{m}$ 的 SiO_2 层,即隔离介质。

(6)外延生长多晶硅:在上述氧化层上,外延生长厚约 $400\mu\text{m}$ 的多晶硅层,作为衬底用。

(7)磨平多晶硅:将多晶硅表面磨平与原单晶片表面平行。

(8)研磨单晶片:将原单晶片表面研磨,直至露出隔离槽底,再进行抛光,这样原来N型单晶硅被 SiO_2 介质隔离成一些孤立的小岛。至此,完成了介质隔离。

这种介质隔离不需要外加偏置电压,且不存在寄生晶体管效应,这是它的最大的优点。这种隔离技术与PN结隔离相比是更加完善了。但是由于它的工艺复杂,成品率较低,因而只用于隔离性能要求较高的集成电路中。

二、晶体管

集成电路中的晶体管是用平面工艺制作在硅片隔离岛上,电极引线都是从硅片表面上引出的。它一般也分为NPN管与PNP管。

集成电路中的晶体管大部分为NPN管,它与一般分立元件的平面型晶体管的结构很相似。如图1—4(a)所示,制作一个NPN管,第一步是利用光刻技术在小岛上选好基区的位置,除去硅表面氧化层形成窗口,进行一次P型杂质扩散,形成P型基区,扩散后的表面再次氧化。第二步是再次光刻,在选好发射区与集电区引出处,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，形成发射极和集电极的引出部位(N^+ 区)，扩散后的表面也再次氧化。这样经过两次扩散以后，NPN型晶体管便形成了。第三步是在第三次光刻的基础上，把各电极引出部位的氧化层除掉，露出窗口，采用蒸铝的工艺，在整个片子的表面上淀积一层铝，完成各电极和各元件之间的连接线，再按连线图形，把不需要的铝层部分进行第四次光刻腐蚀掉。并置于真空中加热，使铝和硅之间形成良好的电极接触，其放大与频率等主要特性与分立元件晶体管类似。

PNP晶体管在集成电路中很少用。早期利用生产NPN管的工艺，要在同一硅片上制作性能优良的PNP管是比较困难的。近些年来，因集成电路工艺的发展，可以实现在同一硅片上制作NPN管的同时制作PNP管。其中最常用的是一种横向PNP管，它的P型发射区和集电区是在制作NPN管的P型基区的同时制成的，而N型基区则对应于NPN管的集电区，如图1—4(b)所示。在此以前，无论是分立元件或是集成电路的PNP管和NPN管，其内部载流子总是沿着晶体管纵向断面的垂直方向流动的，故称为纵向晶体管。而在图1—4(b)中，由于它的载流子是沿着断面的水平方向流动，故称它为横向PNP晶体管。

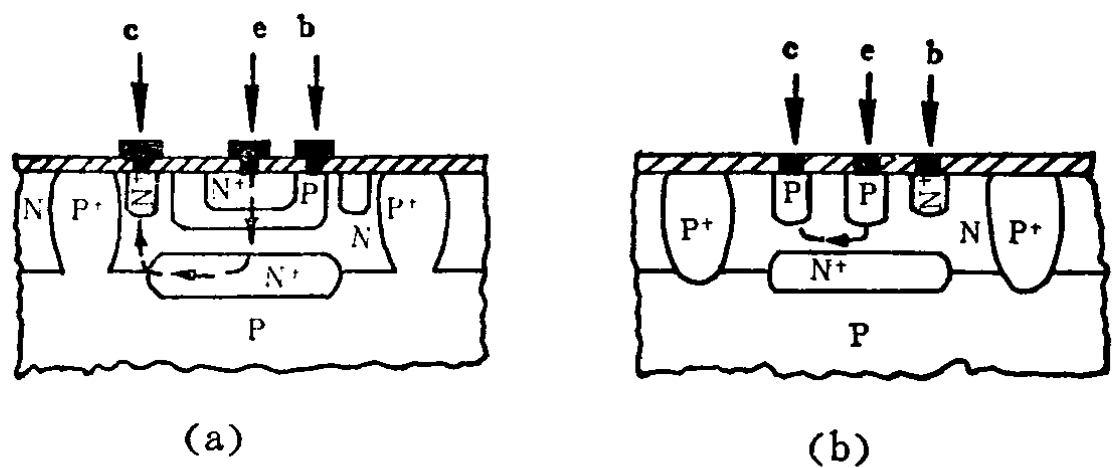


图1—4 纵向的NPN晶体管和横向PNP晶体管

由于工艺条件的限制，横向晶体管的基区宽度不能作得很窄，一般在5~20微米，以致电流放大倍数 β 值很低（一般 $\beta=3\sim5$ ）且高频特性很差，共发射极的特征频率 f_T 不高，一般仅有几兆赫，

因此横向PNP晶体管多用于低频电路，这是它的缺点。但是由于横向PNP管结构特殊，因而它的独特优点是b-e结和b-c结具有较高的反向击穿电压。因此在后来的集成电路的设计时，常将纵向NPN管和横向PNP管组成复合管，扬长避短，发挥各自的优势。即复合管既具有纵向NPN管较高的 β 值和较好的频率特性，又具有横向PNP管较高的反向击穿电压的特长，而避免二者的短处，形成性能优良的各种放大电路。

三、二极管

在集成电路中二极管的结构与晶体三极管相同，从原理上说晶体管任何一个PN结都可作为二极管，或者把晶体管的发射极、基极、集电极中的任何两个极短接起来也可以构成二极管，只是它们的正向压降、反向击穿电压、结电容和存贮时间有所不同，图1—5所示是常用的三种二极管的结构形式，现分别介绍如下：

1. 衬底二极管

在图1—5(a)中，由P型衬底和N型外延层之间的PN结，便构成了一只衬底二极管。+、-号表示二极管的正负极，这种二极管，虽然具有较高的反向击穿电压，但因硅片的共同衬底(P区)必须接到电源的最低电位，因此使用受到限制。

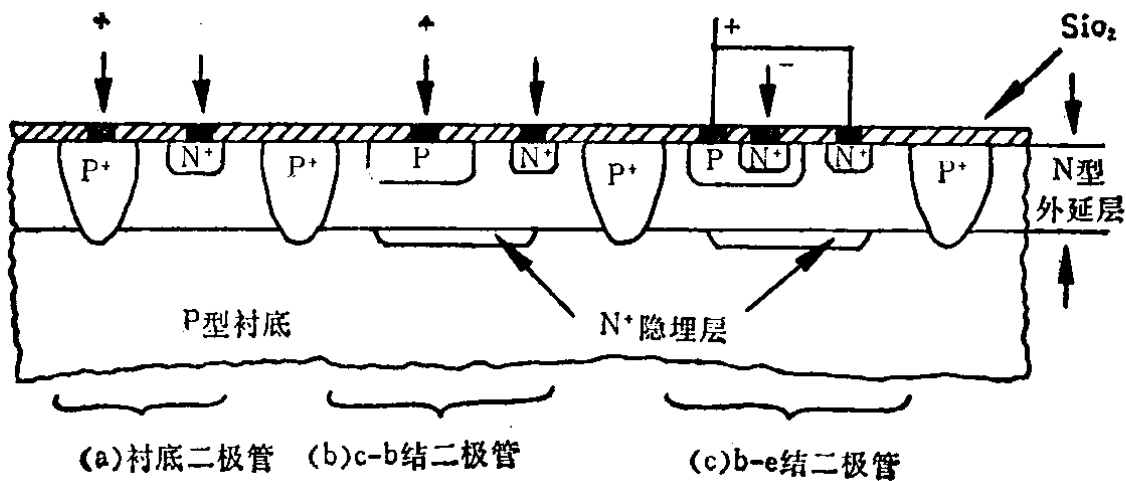


图1—5 三种二极管的结构形式

2. c-b结二极管

在图1—5(b)中，由集电区(P)和基区(N⁺)构成PN结，称c