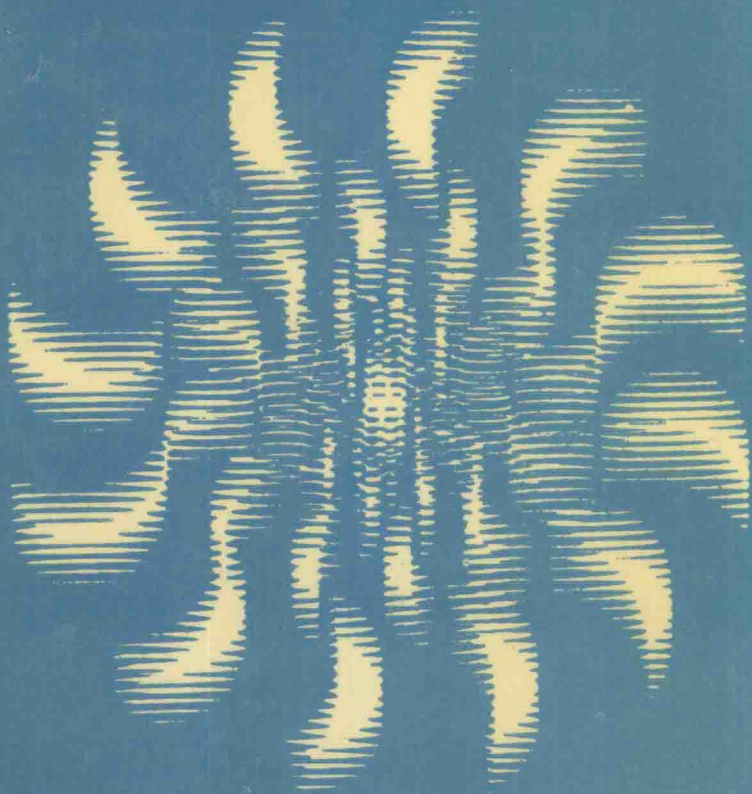


高等学校试用教材

# 模拟集成电路

兰州铁道学院 董保生 合编  
陈 珍

**M** ONIJICHENGDIANLU



高等学校试用教材

# 模拟集成电路

兰州铁道学院	董保生	合编
	陈珍	
北方交通大学	贺允东	主审

中国铁道出版社

1996年·北京

(京)新登字063号

### 内 容 简 介

本书共分九章, 主要内容包括: 放大电路基础, 负反馈放大器, 差分放大器与频率特性, 功率放大器, 集成运算放大器及其应用, 直流稳压电源, MOS场效应管与集成电路, 振荡与频率变换, 光电器件原理及应用等, 为便于教学, 每章都有例题、小结, 并附有习题。

本书为工科院校自动控制、计算机应用与交通信号类等专业的本科教材, 也可供少学时的有线通信专业及电气、电子类的大专班使用。也可作为电子技术领域中工程技术人员的自学参考书。

高等学校试用教材

### 模 拟 集 成 电 路

兰州铁道学院 董保生 陈 珍 合编

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 武亚雯 封面设计 翟 达

北京市燕山联营印刷厂印刷

---

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 18.7 字数: 467千

1993年7月 第1版 1996年8月第2次印刷

印数: 2501—5500册

---

ISBN 7-113-01439-9/TN·61 定价: 14.90元

# 前 言

本教材是根据国家教委制订的高等工业学校《电子技术基础教学大纲》(草案)(模拟电子技术部分)的要求编写的。

近年来随着电子技术的发展,模拟集成电路取得了很大的进展,新的集成电路不断涌现,正越来越多地取代分立元件电路,所以在教材中力求贯彻“以集成为主”的思想,较早地引入模拟集成电路的内容,而且增加了调制与解调的基本内容,为使学生对今后专业面的拓宽,打下一定的基础。在内容安排上,注意贯彻从实际出发、由浅入深、由特殊到一般、从感性上升到理性等原则,在每章中均有集成片的实际应用电路。为了加深对课堂知识的理解,各章中均有若干个例题及内容小结,并配有有一定数量的思考题与习题。

在教材编写过程中,除了基本内容以外,还编写了一些较深入及应用方面的内容,这些内容均在标题前注有星号(★),不同专业可根据学时的多少,由教师灵活删选,也可供读者自学参考。本教材适合100学时左右的课程使用。

本课程是一门实践性很强的技术基础课,应与实验课密切配合,以加深对理论知识的理解,并学会电子仪器的测试方法,加强动手能力,使理论与实践紧密地相结合。

本教材由兰州铁道学院董保生、陈珍合编,其中第一、二、三、七章由陈珍编写,第四、五、六、八、九章由董保生编写,最后由陈珍统稿。北方交通大学贺允东教授担任本书的主审。

参加本书评审工作的有:北京邮电学院宋亚民教授、兰州铁道学院班冀超教授、北方交通大学范希鲁教授、耿文学副教授、西南交通大学须元昭副教授、华东交通大学钱碧云副教授、上海铁道学院聂美声副教授和大连铁道学院张汉生副教授、长沙铁道学院黄建阳、彭绍伦副教授等。他们对初稿进行了认真的审阅,并提出了很多的宝贵意见,我们在此一并表示衷心的感谢!

我们水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳切期待专家与读者给予批评、指正。

编 者

1991.7.

# 目 录

## 第一章 放大电路基础

第一节 半导体的物理结构	1
一、半导体的特性	1
二、本征半导体	1
三、杂质半导体	3
第二节 PN结与晶体二极管	5
一、PN结的基本原理	5
二、晶体二极管	7
第三节 晶体三极管	11
一、晶体三极管的工作原理	11
二、三极管的电流分配关系	13
三、三极管的特性曲线	15
四、三极管的主要参数	17
第四节 放大电路的基本分析方法	20
一、放大器的工作原理	20
二、放大电路的图解分析法	22
三、放大电路的等效电路分析法	27
第五节 放大器工作点的稳定及偏置电路	32
一、工作点的稳定问题	32
二、分压式射极偏置稳定电路	33
三、其它稳定工作点的偏置电路	34
第六节 共集电极电路与共基极电路	35
一、共集电路(射极输出器)	35
二、共基电路	38
三、共射、共集、共基极三种电路的性能比较	40
第七节 集成电路原理	41
一、集成化元、器件及其特点	41
二、集成电路中的偏置及有源负载	43
本章小结	48
思考题与习题	49

## 第二章 负反馈放大器

第一节 反馈的基本概念	56
-------------	----

一、什么是反馈	56
二、反馈基本方程式	57
第二节 负反馈放大器的分类	58
一、电流串联负反馈放大器	58
二、电压串联负反馈放大器	60
三、电流并联负反馈放大器	61
四、电压并联负反馈放大器	62
第三节 负反馈对放大器性能的影响	64
一、增益稳定性提高	64
二、展宽频带	65
三、改善放大器的非线性失真	66
四、对放大器输入、输出电阻的影响	66
五、信号源内阻 $R_s$ 对反馈放大器性能的影响	71
第四节 负反馈放大器的方框图分析法	72
一、电压并联负反馈放大器的计算	72
二、电流串联负反馈放大器的计算	74
三、电压串联负反馈放大器的计算	76
四、电流并联负反馈放大器的计算	77
第五节 单片集成负反馈放大器	78
一、LA3210——前置放大集成电路	78
二、SA-20宽频带放大器集成电路	79
本章小结	79
思考题与习题	80

### 第三章 差分放大器与频率特性

第一节 差分放大器	84
一、直接耦合放大器及其零点漂移	84
二、基本差分放大器	85
三、提高差分放大器技术指标的电路	90
四、差分放大器的失调和漂移	93
五、差分放大器的传输特性	95
第二节 放大电路的频率特性	97
一、频率特性的基本概念	97
二、频率特性的分析方法	99
三、晶体三极管的混合 $\pi$ 型等效电路	103
四、单级差分放大器的高频特性	107
*第三节 宽频带放大器	111
一、共射-共基组合电路	112
二、共集-共基组合电路	112
三、集成宽频带放大器举例	113

本章小结·····	116
思考题与习题·····	117
<b>第四章 功率放大器</b>	
第一节 功率放大器的特点·····	120
第二节 单管甲类功率放大器·····	121
第三节 乙类推挽功率放大器·····	122
一、互补对称功率放大器·····	123
二、变量器耦合推挽功率放大器·····	129
*第三节 集成电路功率放大器·····	131
一、集成电路双声道功率放大器——LM379·····	131
*二、LM379主要性能与典型应用电路·····	133
本章小结·····	134
思考题与习题·····	135
<b>第五章 集成运算放大器及其应用</b>	
第一节 集成运算放大器电路的组成与典型电路的分析·····	137
一、集成运算放大器的性质与组成·····	137
二、典型集成运放电路(F007)的分析·····	138
三、集成运算放大器的主要技术参数·····	141
第二节 集成运算放大器的应用·····	145
一、集成运算放大器的两种基本运算电路·····	145
二、集成运算放大器在模拟运算电路中的应用·····	148
三、电压比较器·····	154
四、脉冲信号发生器·····	158
本章小结·····	161
思考题与习题·····	162
<b>第六章 直流稳压电源</b>	
第一节 整流滤波电路·····	169
一、整流电路·····	169
二、滤波电路·····	172
第二节 串联型稳压电路·····	175
一、硅稳压管稳压电路·····	175
二、串联型稳压电路·····	178
第三节 集成稳压器·····	181
一、W7800系列集成稳压器电路原理·····	182
*二、W7800系列集成稳压器的应用·····	185
*第四节 脉宽调制(PWM)型开关稳压电路·····	186
一、脉宽调制型开关稳压电源的工作原理·····	186

二、脉宽调制型开关电源集成控制器的应用	189
本章小结	189
思考题与习题	190

## 第七章 MOS场效应管与集成电路

第一节 MOS型与结型场效应管	192
一、MOS型场效应管	192
二、结型场效应管	197
三、场效应管的特点	199
第二节 场效应管的主要参数和微变等效电路	201
一、参 数	201
二、微变等效电路	205
第三节 场效应管基本放大电路	207
一、偏置电路	207
二、基本放大电路	211
*第四节 MOS模拟集成电路	215
一、MOS模拟集成单元电路	215
二、MOS模拟集成电路	222
本章小结	225
思考题与习题	225

## 第八章 振荡与频率变换

第一节 无线电发送与接收系统简介	230
第二节 正弦波振荡器	232
一、自激振荡原理与条件	237
二、LC正弦波振荡器	235
*三、石英晶体振荡器	240
四、RC桥式振荡器	244
五、集成电路振荡器	245
第三节 调幅与检波	247
一、调幅原理	247
二、调幅波的频谱与功率	249
三、乘积调幅器	250
四、调幅波解调器——检波器	259
第四节 调频与鉴频	262
一、调频原理与调频波性质	262
二、调频器	266
三、鉴频器	268
第五节 混 频	271
一、晶体管混频器的工作原理	272



二、混频器中干扰简述.....	273
本章小结.....	274
思考题与习题.....	274
<b>*第九章 光电器件原理及应用</b>	
第一节 光电二极管、光电三极管的原理及应用.....	278
一、光电二极管、光电三极管的结构与工作原理.....	278
二、光电二极管、三极管的主要参数和特性.....	282
三、光电二极管、光电三极管应用电路.....	284
第二节 发光二极管的工作原理及其应用.....	285
一、发光二极管(LED)的工作原理.....	285
二、发光二极管的特性及应用.....	286
第三节 光电耦合器的工作原理及其应用.....	287
一、光电耦合器的工作原理.....	287
二、光电耦合器的应用举例.....	289
本章小结.....	290
思考题与习题.....	290
参考文献.....	291

# 第一章 放大电路基础

晶体管分立元、器件及其组成的电路是集成电路的基础，因此本章首先介绍半导体的物理结构、PN结、晶体二极管、三极管的工作原理及参数，然后介绍共射极、共集电极、共基极三种基本放大器的分析方法以及温度稳定电路，最后介绍集成电路的基本结构与原理。

## 第一节 半导体的物理结构

### 一、半导体的特性

晶体二极管（简称二极管）、晶体三极管（简称晶体管或三极管）、场效应管和集成电路等器件，都是由半导体材料制成的，因此半导体本身具有什么样的特性，这是首先要了解的问题。

半导体的命名，是因为它的导电能力介于导体与绝缘体之间，但导电机理与导体全然不同。常用的半导体材料有锗、硅等。半导体之所以得到广泛的应用，是因为它具有一系列特殊的性能。

(1) 半导体的电导率可以随加入适当的杂质作明显的改变。例如，纯锗中掺入一亿分之一的杂质（称作掺杂），在30℃时，其电导率将增加到12倍，正因为掺杂可以改变和控制半导体的电导率，才能利用它制造出各种不同的半导体器件。但另一方面，如果在制造半导体器件的过程中，掺杂控制得不适当或净化设备不良，都会造成半导体器件的成品率大大降低。

(2) 温度可以明显地改变半导体的电导率，利用这种热敏效应，可以制成热敏元件。但另一方面，热敏效应使半导体器件在运用中热稳定性较差，因此，在半导体器件组成的电路中，要有温度补偿及稳定的措施。

(3) 光照不仅可以改变半导体的电导率，某些半导体材料光照还可以产生电动势，这就是半导体的光电效应。利用光电效应，可以制成各种光敏器件和光电池。光电池已在空间技术中得到广泛的应用，而且为人类利用太阳能提供了广阔的前景。

### 二、本征半导体

结构完整的纯净半导体，称为本征半导体。

制造半导体器件，目前最常用的半导体材料是硅（Si）和锗（Ge），经过加工提纯后的单晶硅或锗即属于本征半导体。

#### (一) 硅和锗原子的共价键结构

物质的导电性能决定于其原子结构。从图1—1硅和锗的原子模型中可见，它们的一个共同特点就是最外层电子数都是4个，根据原子理论知道，当原子的外层电子有八个时才处

于稳定状态，因此在组成单晶时，每个原子都要从四周相邻原子取得四个价电子，以构成稳定状态。这样，每相邻两个原子都共用一对价电子，形成了共价电子对，这种结构称为共价键结构，如图 1—2 所示。

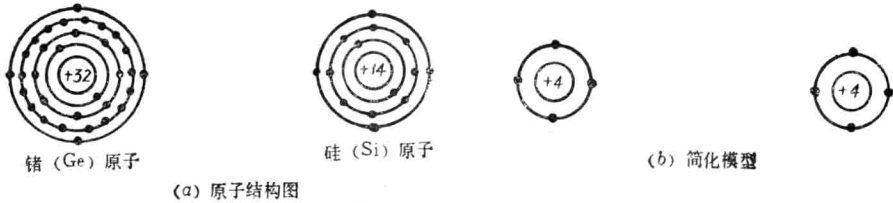


图 1—1 锗和硅原子结构模型

### (二) 本征半导体中的载流子——电子和空穴

对于本征半导体，在绝对零度和无外界激发状况下，其中的价电子几乎都处于共价键结构中，不能参与导电。在外界光和热的激发下，本征半导体中，少量共价电子挣脱共价键的束缚，成为自由电子。这样，在价电子原来的位置上，就留下了一个空位，这个空位有个专门的名称，叫做“空穴”，如图 1—3 所示。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

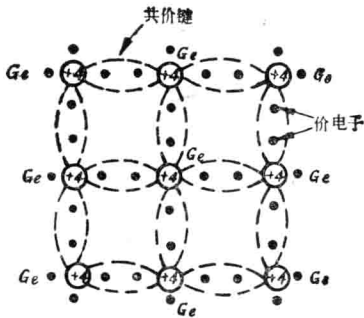


图 1—2 锗晶体的共价键结构

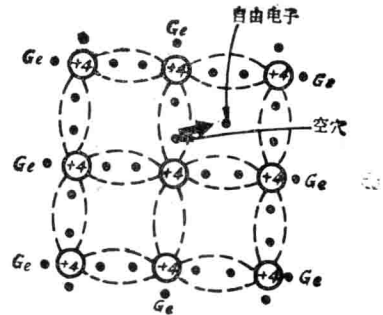


图 1—3 本征半导体中的自由电子与空穴

当共价键上留下空穴时，邻近共价键中的价电子就容易跳过来填补这个空穴，从而使空穴转移到邻近共价键上去，而后新的空穴又被其相邻的价电子填补。带负电荷的价电子依次填补空穴的运动，与带正电荷的空穴作反方向运动的效果相同。由此可见，半导体中有两种载流子，即带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。在没有外加电场作用时，自由电子和空穴的运动都是无规则的，没有定向的运动，所以不形成电流。在外电场作用下，自由电子与空穴都将产生定向的运动，而形成电流，如图 1—4 所示。在外电路中电流的方向是一致的。

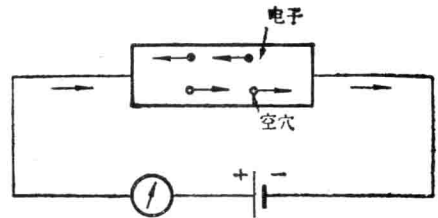


图 1—4 本征半导体中电流的形成

综上所述，可以总结如下：

(1) 在本征半导体内, 自由电子和空穴总是成对出现的, 称为电子-空穴对。也就是说, 有一个自由电子, 就必然有一个空穴, 自由电子和空穴数总是相等的。

(2) 空穴的移动始终是束缚电子在共价键范围的移动, 它和已挣脱共价键束缚的自由电子的运动是有区别的。

(3) 自由电子与空穴都能在外电场的作用下产生定向运动而形成电流。

(三) 本征激发和复合

由于热激发, 本征半导体产生电子-空穴对, 这一现象称为本征激发。其电子-空穴对的数量与哪些因素有关呢?

若用  $n$  表示单位体积的自由电子数目 (电子浓度), 用  $p$  表示单位体积的空穴数目 (空穴浓度), 在本征半导体中, 电子和空穴的浓度分别用  $n_i$  和  $p_i$  表示, 则有

$$n = p = n_i = p_i \quad (1-1)$$

根据波尔兹曼统计理论和量子理论分析可得

$$n_i = p_i = A_0 T^3 / 2 e^{-E_{G0}/2kT} \quad (1-2)$$

式中  $A_0$ ——与半导体材料有关的常数 (硅  $A_0 = 3.87 \times 10^{16}$ ; 锗  $A_0 = 1.76 \times 10^{16}$ );  
 $E_{G0}$ ——0K时的禁带宽度\* (以eV表示) (硅  $E_{G0} = 1.21\text{eV}$ ; 锗  $E_{G0} = 0.785\text{eV}$ );  
 $T$ ——绝对温度 (以K表示);  
 $k$ ——波尔兹曼常数 ( $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{J/K} = 8.6 \times 10^{-5}\text{eV/K}$ )。

由上式可见, 本征半导体中的载流子浓度, 当材料确定后主要与温度  $T$  有关, 温度升高激发而产生的电子-空穴对数目增加, 使载流子浓度增加。在室温下 ( $T = 300\text{K}$ ), 锗的  $E_G = 0.72\text{eV}$ , 硅的  $E_G = 1.1\text{eV}$ , 代入式 (1-2) 中可得

硅的  $n_i = 1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ; 锗的  $n_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$

由上数据可见, 在室温下, 硅的本征载流子浓度比锗的本征载流子浓度约小一千多倍, 所以硅器件的漏电流比锗器件小得多。

与本征激发相反, 自由电子在运动中由于互相碰撞作用以及原子核的吸引, 又可能失去动能, 而又填补到空穴中去, 致使电子与空穴成对地消失, 这种现象称为复合。在半导体中, 本征激发和复合, 这两种现象同时存在, 当单位时间、单位体积内本征激发产生的电子-空穴对 (产生率) 等于复合掉的电子-空穴对 (复合率) 时, 激发与复合达到动态平衡, 在一定温度下, 本征半导体中, 载流子浓度维持一定, 此即为式 (1-2) 的物理意义。

当温度越高,  $n_i$  越大, 而电阻率越小, 这表明半导体具有负的温度系数。从式 (1-2) 还可看出,  $n_i$  与温度  $T$  基本上成指数关系, 当温度增加时,  $n_i$  显著地增大, 就会影响半导体器件的参数发生变化。这在半导体器件组成的电路中, 使工作不稳定, 是不利的, 需特别加以注意。

### 三、杂质半导体

在本征半导体中, 人为地掺入少量其它元素 (称杂质), 可以使半导体的导电性能发生显著地变化。利用这一特性, 制成了人们所期望的各种性能的半导体器件。

\* 参阅参考文献 [1] 3—4 页。

根据掺入杂质的性质不同，可分为两种杂质半导体：电子型（N型）半导体和空穴型（P型）半导体。

（一）N型半导体

在本征半导体中，掺入少量的五价元素（常用的有磷、砷和锑），可以构成N型半导体。

例如将少量的五价元素磷，掺入单晶硅中，一些磷原子将取代晶格结构中的硅原子，形成如图1—5（a）所示的结构。每个磷原子外层的五个价电子，除了与相邻四个硅原子以共价键方式相结合以外，还多一个价电子。在室温下，这个价电子比较容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子，磷原子则变为正离子被束缚在晶格结构中。由于磷原子很容易施余出一个自由电子，故称为“施主杂质”。

例如掺杂浓度为百万分之一，每个磷原子产生一个自由电子，则由掺杂产生的自由电子浓度约为 $10^{16}/\text{cm}^3$ 数量级，远大于原来由本征激发产生的电子-空穴对浓度，于是电子成为这种半导体中的主要载流子。我们称这种半导体为电子型（N型）半导体，并且称自由电子为“多数载流子”（简称多子），而空穴称为“少数载流子”（简称少子）。有时我们把N型半导体形象化地表示为如图1—5（b）所示。

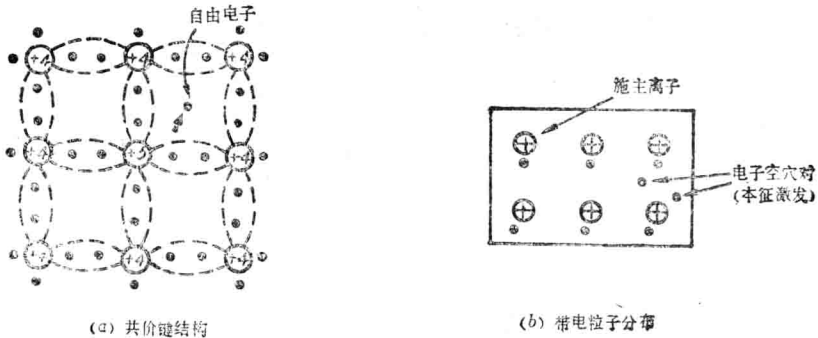


图1—5 N型半导体

（二）P型半导体

在本征半导体中，掺入少量的三价元素（常用的有硼、铝和镓）可以构成P型半导体。

例如将少量的三价元素硼，掺入单晶硅中，一些硼原子取代晶体结构中的硅原子，形成如图1—6（a）所示的结构。硼是三价元素，每个硼原子只能与相邻的三个硅原子之间构成完整的共价键，而与相邻的第四个硅原子之间构成不完整的共价键，即价键上存在一个空位，这就使邻近硅原子价键上的价电子很容易过来填补，结果使硼原子变为负离子，而在邻近的硅原子的价键上出现一个空穴。由于硼原子很容易接受电子，故称为“受主杂质”。将这种以带正电的空穴为主要载流子的半导体，称为空穴型（P型）半导体，我们也可把P型半导体形象化地用图1—6（b）表示。

如果在N型半导体中再掺入足够浓度的P型杂质，大部分电子将被空穴复合掉，还多出大量空穴，结果使N型半导体转变为P型半导体，这种作用，称为“杂质补偿”。在制造平面型半导体管及集成电路中，广泛采用的多次扩散掺杂工艺，就是利用这种“杂质补偿”作

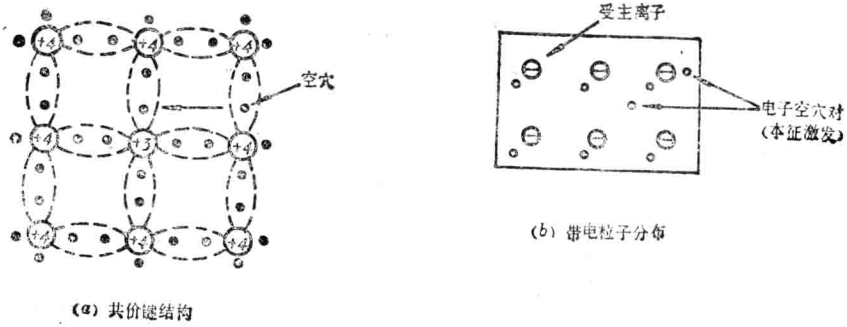


图 1-6 P型半导体

## 第二节 PN结与晶体二极管

### 一、PN结的基本原理

#### (一) PN结的形成

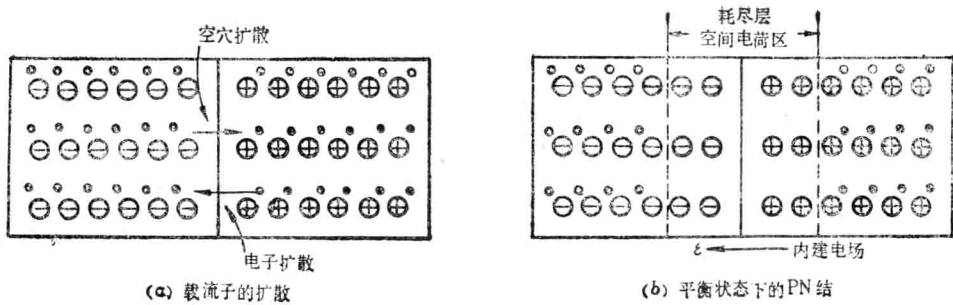


图 1-7 PN结的形成

PN结是将P型和N型半导体，通过一定的掺杂工艺结合而成的。结合以后，在交界面的两边，由于P区的空穴浓度大，大量空穴将通过交界面向N区扩散。与此同时，N区的电子浓度大，电子将向P区扩散。由两类多数载流子的扩散运动，形成扩散电流，其方向从P区向N区，上述扩散运动是有限的。因为交界面两边的载流子向对方扩散后，在交界面两侧分别留下不能移动的正、负离子，如图1-7所示。在交界面附近，P区内留下带负电的受主杂质离子，形成负空间电荷层。在另一边N区内留下带正电的施主杂质离子，形成正空间电荷层。在正、负电荷层之间建立一定的电位差和内电场，内电场方向由N区指向P区。内电场将削弱扩散运动，但有利于交界面两边少数载流子各自向对方的漂移运动，产生漂移电流，方向由N区流向P区。起初，扩散电流远大于漂移电流，随着扩散运动的进行，正、负空间层的电荷量增加，内电场随着增强，扩散电流逐渐减小，直至扩散电流等于漂移电流，达到动态平衡。在动态平衡下，交界面上维持一定宽度（约几微米~几十微米）的正、负空间电荷区，这就是PN结，在空间电荷区内几乎不存在载流子，称为耗尽区，它对两边多数载流子的扩散过程具有阻挡作用，故又称为阻挡层或电位壁垒。在阻挡层中电位分布情况如图1-8所示。内电场在PN结中产生的电位差，称为接触电位差 $U_0$ ，它主要由半导体

材料和掺杂浓度决定，一般硅的  $U_{\phi} \approx 0.7V$ ，锗的  $U_{\phi} \approx 0.2V$ 。

PN结两侧的正、负空间电荷区，带电量相等，整体保持电中性。例如P区和N区的掺杂浓度相同，那么正电荷层的厚度等于负电荷层的厚度。实际使用的PN结，两边掺杂浓度往往相差很大，形成所谓不对称PN结，如图1—9所示为N区掺杂浓度大于P区掺杂浓度的情况，此时阻挡层主要伸向P区，这种PN结记作PN<sup>+</sup>结，N<sup>+</sup>表示高掺杂区。

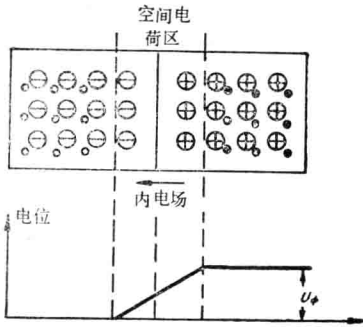


图1—8 PN结的内电场和电位分布

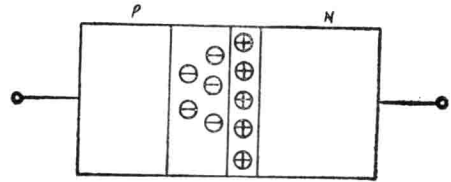


图1—9  $N_D > N_A$ 时的PN结

## (二) PN结的单向导电性

PN结的重要特性，就是当外加电压时，呈现单向导电特性。

### 1. 外加正向电压——PN结导通

将电源的正极接到P区一端，负极接到N区一端，如图1—10所示，这种接法称为PN结加正向电压或称正向偏置，这时如在外电路接一电流表，则有较大的电流流过。原因是：由于外加电压的电场方向与PN结内电场的方向相反，抵消了一部分内电场，使PN结的电位差减小为  $(U_{\phi} - U)$ ，亦即电位壁垒变低，有利于多数载流子的扩散运动，形成很大的扩散电流，这即为PN结的导通状态。当外加正向电压  $U$  升高时，PN结的内电场被进一步削弱，正向电流随外加电压的增加而显著的上升。在这种情况下，由少数载流子形成的漂移电流仍然存在，方向与扩散电流相反，但其值很小，可忽略不计。

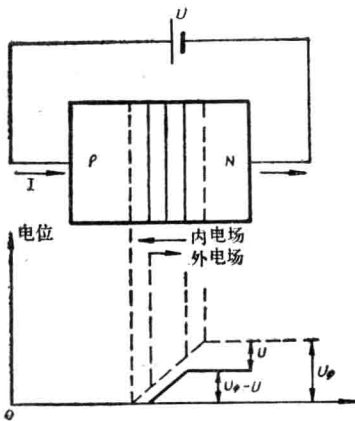


图1—10 外加正向电压时的PN结

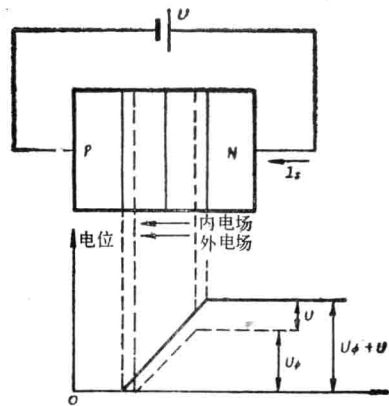


图1—11 外加反向电压时的PN结

### 2. 外加反向电压——PN结截止

如将电源的负极接P区一端，而将正极接N区一端，如图1—11所示，这种接法称为PN结加反向电压或称反向偏置。这时如在外电路接一电流表，则流过的电流很小，因为这

时外电压  $U$  形成的电场方向与PN结的内电场的方向一致，使PN结的电位增大为  $(U_0 + U)$ ，亦即电位壁垒变高，使多子的扩散运动大大地削弱而趋近于零。但外电场及内电场的方向都有利于少子的漂移运动，因此外电路中很小的反向电流就是由少子的漂移运动而形成的，当材料一定时其值的大小主要决定于温度，温度一定时，其值基本不随外加电压而改变，故称此电流为反向饱和电流  $I_s$ 。 $I_s$  值与PN结加正向电压时形成的正向电流相比，其值很小，故PN结处于截止状态。

PN结加正向电压时，呈现导通状态（正向电流较大），加反向电压时，呈现截止状态（反向饱和电流  $I_s$  很小）。这就是PN结的单向导电性。

(三) PN结的电流方程

上面我们定性地讨论了PN结在外加正向电压及反向电压的作用下，内部载流子运动及外电路电流的变化情况。而外加电压与电流之间的定量关系，可以由半导体物理理论推导得出\*，其关系式称为PN结的电流方程，电流  $I$  为

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1) \tag{1-3}$$

式中  $U$  —— 外加电压，

$I_s$  —— 反向饱和电流，

$U_T$  —— 等效电压  $(U_T = \frac{kT}{q})$ 。

室温下 ( $T=300K$ )， $U_T \approx 26mV$  ( $k$  为波尔兹曼常数)。由式 (1-3) 可知，当外加正向电压时  $U \gg U_T$ ，则正向电流可近似为

$$I \approx I_s e^{U/U_T} \tag{1-4}$$

当外加的正向电压增高时， $I$  随  $U$  按指数关系上升， $I$  增加的很快。当外加反向电压时， $U$  值为负，则  $e^{U/U_T} \ll 1$ ，因此反向电流为

$$I \approx -I_s \tag{1-5}$$

由式(1-4)和式(1-5)的结果可看出：用理论的定量计算与PN结的定性分析的结果是一致的，都说明了PN结的单向导电特性。

由式 (1-3) 可画出 PN 结的外加电压与电流之间的关系曲线，简称伏安特性曲线，如图 1-12 所示。

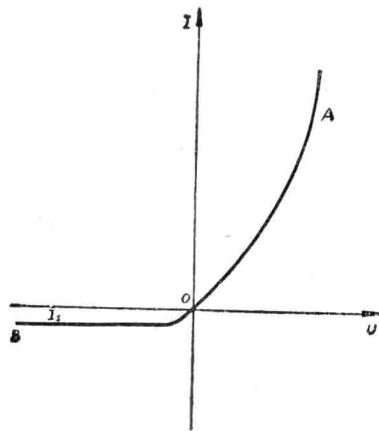


图 1-12 PN结的理想伏安特性

## 二、晶体二极管

### (一) 晶体二极管的伏安特性

晶体二极管是由一个PN结加上相应的电极引线和管壳而制成的，如图 1-13 (a) 所示。虽然各种类型的晶体二极管在制造工艺上各不相同，但在电路中均可用图 1-13 (b) 符号表示，图中二极管箭头的方向即表示正向电流的方向。

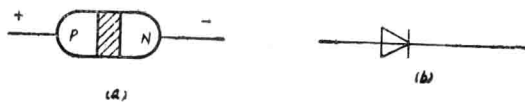


图 1-13 晶体二极管

二极管的伏安特性可用逐点描绘法或由专

\* 参考文献 [1] 117~20页。



用的图示仪直接测得。

由于二极管的引出线及半导体内部存在电阻，同时二极管表面还有漏电流等因素，实测的二极管伏安特性（如图 1—14所示）与PN结的理想伏安特性存在着一些差别。对二极管的伏安特性特别强调以下几点：

(1) 在正向特性的起始部分存在着门限电压。

起始部分由于正向电压较小，外电场还不是以克服PN结的内电场，这时正向电流非常小，几乎为零。而当正向电压大于一定值 $U_r$ 后，电流随电压的增加而迅速地增大，故称 $U_r$ 为“门限电压”。硅管的 $U_r \approx 0.5 \sim 0.7$  (V)，锗管的 $U_r \approx 0.1 \sim 0.2$  (V)（因硅和锗的禁带宽度不同所致）。

(2) 当正向电流较大时，由于半导体的内电阻及引线电阻等的影响，实际正向特性如图 1—14中 1 段的虚线所示，它偏离了指数特性而趋近于线性。

(3) 反向饱和电流 $I_s$ ，在同样的温度下，硅管约在 nA( $10^{-9}$ A) 数量级，而锗管约在  $\mu$ A( $10^{-6}$ A)数量级。从图 1—14中可看出温度同在20℃情况下，硅管的 $I_s$ 比锗管的 $I_s$ 要小的多，因此硅管的温度特性好于锗管。

(4) 当反向电压增加到一定的数值 $U_B$ 时，反向电流剧增，这叫二极管的反向击穿，对应的电压 $U_B$ 称为反向击穿电压，如图 1—14中 3 段所示。

产生反向击穿的原因是：当反向电压高到一定数值时，外电场过强，少子漂移的速度加大，因而与原子碰撞中产生新的电子-空穴对，并由于链锁反应引起载流子数量的急剧增加，反向电流增加很快，这种现象称为雪崩击穿。另一种情况是，当掺杂浓度较高，内电场本来已经很强，不需要很高的外加反向电压，由电场直接破坏共价键，拉出价电子，产生大量电子-空穴对，这种作用称为场致激发，由场致激发引起的击穿现象称为齐纳击穿。在掺杂浓度高以及低反向电压条件下，发生的击穿现象多为齐纳击穿。二极管击穿时，单向导电性遭破坏，式（1—3）不适用于击穿区的伏安特性。但是利用二极管反向击穿时电流剧增而电压基本不变的特性，可以制成稳压二极管（只要电流与电压的乘积不超过极限值，这种击穿是可逆的）。稳压管在电路中的符号如图 1—15所示。

### (二) 晶体二极管的电容效应

二极管除了具有单向导电特性以外，还具有电容效应。二极管在高频运用的情况下，单向导电特性变差，这主要是电容效应所致。二极管的电容分为势垒电容和扩散电容两部分。

#### 1. 势垒电容 $C_i$

由于PN结空间电荷区的电荷量随着外加电压而变（如图 1—16所示），其作用与普通电容器上的充放电现象类同，称为势垒电容，记作 $C_i$ 。

由理论分析\*知，在小信号电压作用下， $C_i$ 可用下式表示

$$C_i = \frac{K}{(U_s - U)^n} \tag{1-6}$$

式中  $U_s$ ——PN结的接触电位；

$U$ ——外加电压（正向电压 $U > 0$ ，反向电压 $U < 0$ ）；

$K$ ——由半导体的材料及结构决定的常数；

$n$ ——可由 $1/3 \sim 4$ ，决定于PN结附近的杂质分布情况。

由上式可见，加正向电压时，分母项减小， $C_i$ 增大，加反向电压时，分母项增大， $C_i$ 减

\* 参考文献[8]96—98页。