

邮电高等学校专科教材

# 电子电路

邱天富 编 谢沅清 审



人民邮电出版社

7

邮电高等学校专科教材

# 电 子 电 路

人民邮电出版社

登记证号(京)143号

### 内 容 提 要

本书共分十二章,包括半导体器件的结构、工作原理与外部特性;晶体管与场效应管基本放大电路的组成及其工作原理;放大器的频率特性;负反馈放大电路;集成运算放大器的原理及其应用;低频功率放大器;高频功率放大器;正弦波振荡器;调制与解调;变频与倍频;直流稳压电源等内容。书中力求简明清晰地阐述半导体器件及其电路的基本原理、基本分析方法,并结合应用实例。

本书可供邮电高等院校或其它工科院校通信电工类专科作为教材,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

邮电高等学校专科教材

### 电 子 电 路

邱天富 编

谢沅清 审

\*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

\*

开本: 850×1168 1/32 1992年9月 第 一 版

印张: 15 页数: 240 1992年9月 河北第1次印刷

字数: 398 千字 印数: 1—3000 册

ISBN7-115-0473E-9/G·183

定价: 4.80元

# 前 言

电子电路课是通信电子类专业的一门技术基础课。主要学习半导体器件的结构、工作原理和外部特性，电子电路的基本工作原理和基本分析方法。

通过对半导体器件及其电路的分析，应能掌握电子技术中的基本概念，电子电路的工作原理、分析方法和基本工程计算方法。在学习中，应注意理论联系实际，通过实验掌握电子电路的安装、调试方面的基本技能，培养分析问题与解决问题的能力。

限于编者水平，书中难免存在很多缺点或错误，欢迎广大读者批评指正。

编者

1991年12月

EAD 102

# 目 录

## 第一章 半导体二极管和三极管

第一节 PN结及其单向导电性·····	( 1 )
第二节 半导体二极管·····	( 14 )
第三节 半导体三极管的工作原理和特性·····	( 24 )
本章小结·····	( 39 )
习 题·····	( 40 )
附录 半导体管型号命名方法·····	( 42 )

## 第二章 基本放大电路

第一节 放大电路的基本分析方法·····	( 44 )
第二节 工作点的稳定问题·····	( 75 )
第三节 几种基本单元放大电路·····	( 86 )
第四节 多级放大电路·····	( 100 )
本章小结·····	( 108 )
习 题·····	( 109 )

## 第三章 场效应管及其放大电路

第一节 结型场效应管·····	( 115 )
第二节 绝缘栅场效应管·····	( 123 )
第三节 场效应管放大电路·····	( 132 )
本章小结·····	( 140 )
习 题·····	( 142 )

## 第四章 放大电路的频率特性

第一节 频率特性的基本概念	( 145 )
第二节 频率特性的近似图示法	( 149 )
第三节 单级RC耦合放大器的频率特性	( 154 )
第四节 多级RC耦合放大器的频率特性	( 162 )
本章小结	( 164 )
习 题	( 164 )

## 第五章 负反馈放大电路

第一节 反馈的基本概念	( 167 )
第二节 负反馈放大器的基本关系式	( 172 )
第三节 负反馈对放大器性能的影响	( 175 )
第四节 闭环放大倍数的近似计算	( 185 )
*第五节 负反馈放大器的分析方法	( 190 )
第六节 负反馈放大器的自激与防止	( 199 )
本章小结	( 206 )
习 题	( 207 )

## 第六章 集成运算放大器

第一节 集成电路的特点与分类	( 213 )
第二节 直接耦合放大器的主要问题	( 215 )
第三节 差动放大器	( 218 )
第四节 集成运算放大电路	( 233 )
第五节 运算放大器的工作原理	( 244 )
第六节 集成运算放大器的应用	( 250 )
本章小结	( 267 )
习 题	( 268 )

## 第七章 低频功率放大器

- 第一节 低频功率放大器概述…………… ( 274 )
- 第二节 无变压器推挽功率放大器…………… ( 278 )
- 第三节 集成功率放大器…………… ( 288 )
- 第四节 功率放大电路的安全问题…………… ( 290 )
- 本章小结…………… ( 293 )
- 习 题…………… ( 293 )

## 第八章 小信号谐振放大器

- 第一节 概述…………… ( 296 )
- 第二节 谐振回路…………… ( 299 )
- 第三节 晶体管的Y参数等效电路…………… ( 320 )
- 第四节 单调谐回路谐振放大器…………… ( 323 )
- 第五节 双调谐回路谐振放大器…………… ( 336 )
- 第六节 集成运放组成的中频放大器…………… ( 341 )
- 本章小结…………… ( 341 )
- 习 题…………… ( 342 )

## 第九章 高频功率放大器

- 第一节 高频谐振功率放大器…………… ( 344 )
- 第二节 宽频带功率放大器…………… ( 356 )
- 本章小结…………… ( 366 )
- 习 题…………… ( 367 )

## 第十章 正弦波振荡器

- 第一节 振荡器的基本原理…………… ( 369 )
- 第二节 LC振荡器…………… ( 374 )
- 第三节 RC振荡器…………… ( 383 )

第四节	振荡器的频率稳定	( 388 )
第五节	石英晶体振荡器	( 389 )
	本章小结	( 395 )
	习 题	( 396 )

**第十一章 频率变换电路**

第一节	概述	( 400 )
第二节	调幅与检波	( 405 )
第三节	调频与鉴频	( 419 )
第四节	锁相环路	( 428 )
第五节	变频	( 434 )
第六节	倍频	( 441 )
	本章小结	( 442 )
	习 题	( 443 )

**第十二章 直流稳压电源**

第一节	小功率整流电路	( 444 )
第二节	滤波电路	( 450 )
第三节	硅稳压管稳压电路	( 453 )
第四节	串联式晶体管稳压电路	( 458 )
第五节	单片集成稳压电源	( 462 )
第六节	开关式稳压电源	( 465 )
	本章小结	( 468 )
	习 题	( 469 )

	参考文献	( 471 )
--	------	---------



# 第一章 半导体二极管和三极管

本章内容：主要介绍半导体材料的基本知识，PN结的物理特性和单向导电原理，半导体二极管的特性与参数。讨论三极管的工作原理，特性与参数。

## 第一节 PN结及其单向导电性

### 一、本征半导体的导电特性

物质结构中可以自由移动的带电粒子统称为载流子。单位体积中载流子的数目称为载流子浓度。物质的导电能力与载流子的浓度有关，例如金属中自由电子的浓度很高，所以它们的导电能力强，称为导体；而橡皮、塑料等物质中自由电子浓度低，所以它们的导电能力差，称为绝缘体。要了解半导体的导电特性，首先应当了解半导体中载流子的情况。

#### 1. 本征半导体及其导电机构

本征半导体就是纯净的结构完整的半导体晶体，常用的有硅(Si)和锗(Ge)单晶体。它们的导电性能介于导体和绝缘体之间，所以称为半导体。硅和锗都是四价元素，每个原子的外层有四个价电子，它们与相邻原子中的价电子组成共价键。在绝对零度和无外界因素影响时，价电子都被束缚在共价键之中，不能自由移动，不参与导电。这时的半导体不能导电，相当于绝缘体。

当半导体的温度升高时，共价键中的价电子因原子的热振动而获得额外的能量，一些价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子。同时在共价键上留下一个空位，这个空位叫做空穴。自由电子带负电，带空穴的原子因失去一个价电子而带正电，把这个正电看成空穴带的正电量。所以空穴所带的正电荷量与电子所带的负电荷量相等。本征半导体中出现一个自由电子，同时产生一个空穴。自由电子和空穴成对出现，称为电子—空穴对。半导体中共价键被破坏，产生电子—空穴对的过程称为本征激发。除加热外，用光照或电场作用也能产生本征激发。

自由电子（简称电子）可以自由移动参与导电，空穴也可以自由移动参与导电。不过空穴移动的方式与自由电子不同，因为相邻原子中的价电子很容易来填充空穴，这时空穴就移到另一个位置上，价电子的移动形成了空穴的移动。可见，半导体中有两种载流子，即自由电子和空穴。

## 2. 载流子的热平衡浓度

本征激发产生的自由电子和空穴是成对出现。自由电子在热运动中也可能放出能量，填充空穴，修复一个共价键。这时自由电子和空穴又成对消失，这个过程称为复合。在一定的温度下，载流子的激发与复合会达到一个动平衡状态。这时的载流子浓度称为载流子的热平衡浓度。用 $n_0$ 和 $p_0$ 分别表示自由电子和空穴的热平衡浓度，在本征半导体中

$$n_0 = p_0 = n_i$$

$n_i$ 称为本征浓度，可以证明：

$$n_i = AT^{3/2} \cdot e^{-E_g/2kT} \quad (1-1)$$

式中 $A$ 为与材料有关的系数； $k$ 为波尔兹曼常数，等于 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 或 $8.616 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ ； $T$ 为绝对温度，单位用K表示； $e$ 为自然对数的底； $E_g$ 为价电子激发所需要的能量，在常温下（ $T=300\text{K}$ ），硅的 $E_g$ 约为 $1.1\text{eV}$ （电子伏特），锗的约为 $0.67\text{eV}$ 。

综上所述:

(1) 半导体中有两种载流子: 电子和空穴。电子带负电, 空穴带正电。

(2) 本征激发, 电子和空穴总是成对出现的。

(3) 半导体中同时存在着载流子的激发与复合。温度一定时, 载流子的激发与复合会达到平衡状态。载流子的热平衡浓度与温度和材料有关。常温下, 本征半导体的载流子热平衡浓度很低, 所以导电性能差。温度升高时载流子的浓度迅速增加, 半导体的导电性能增强。这就是半导体的热敏特性, 利用它可以制造具有负温度系数的热敏电阻。用光照也可以使半导体中载流子的本征浓度增加, 半导体的导电性能增强。这就是半导体的光敏特性。利用这个特性可以制造光敏电阻。此外, 半导体还具有掺杂特性。

## 二、杂质半导体

杂质半导体就是在本征半导体中掺入微量杂质。本征半导体在掺入杂质后导电性能发生显著变化, 这就是半导体的掺杂特性。利用半导体的这种特性, 人们制成了具有各种性能的半导体器件。根据在本征半导体中掺入杂质的不同, 可以分为电子型(N型)半导体和空穴型(P型)半导体两大类。

### 1. N型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素(如磷、砷、锑等), 可使半导体内自由电子浓度增加, 形成N型半导体, 如图1-1所示。

在本征半导体中掺入微量的五价元素后, 杂质原子取代晶格中某些硅(或锗)原子。它的五个价电子在与周围的四个硅(或锗)原子的价电子构成共价键时, 多余出一个价电子。这个价电子不受共价键的束缚, 但仍受本原子核的吸引。与共价键中的价电子相比, 这种吸引力很小, 只要得到很小的能量就可以挣脱原子核的束缚, 成为自由电子。杂质原子失去一个电子成为不能移动的正离子, 这

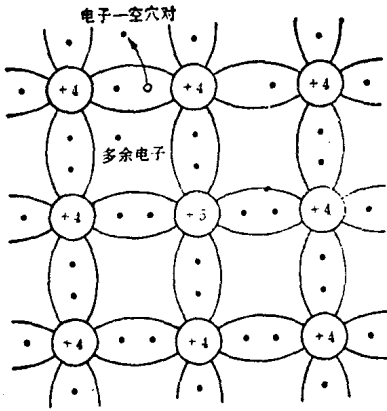


图 1-1 N型半导体晶体结构示意图

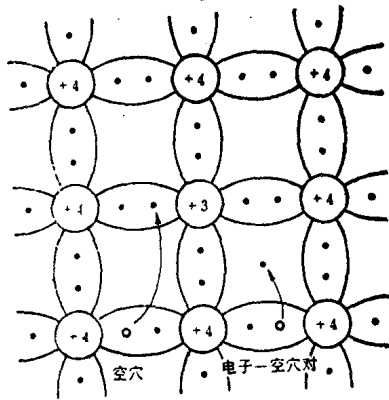


图 1-2 P型半导体晶体结构示意图

个过程称为杂质电离。实际上，在常温条件下杂质原子可以全部电离。五价元素的原子由于电离后给出一个电子，故被称为施主杂质。

在这种半导体中，除本征激发产生的少量电子-空穴对之外，增加了许多由杂质电离而产生的电子。电子的数目远大于空穴的数目，我们把这种主要靠电子导电的半导体称为N型半导体。电子称为多数载流子（简称多子），空穴称为少数载流子（简称少子）。

另外，杂质电离产生一个自由电子，同时出现一个正离子；本征激发电子和空穴成对产生，所以在N型半导体中的电子数目等于正离子和空穴数目之和。电子带负电，正离子和空穴带正电，整块半导体中正负电荷量相等，保持电中性。

## 2. P型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素（如硼、铝、镓、铟等），可使半导体内空穴的浓度增加，形成P型半导体，如图 1-2 所示。

本征半导体中掺入三价元素后，杂质原子取代晶格中某些硅（

或锗)原子。由于三价元素的原子只有三个价电子,与周围四个硅(或锗)原子组成共价键时缺少一个价电子,出现一个空位。常温下,相邻原子的价电子很容易填充这个空位。杂质原子因得到一个价电子而成为负离子,同时出现一个空穴,这个过程称为杂质电离。三价元素由于电离后得到一个价电子,故被称为受主杂质。

在这种半导体中,除本征激发产生的少量电子—空穴对之外,还有杂质电离形成的空穴。所以空穴的数目远大于电子的数目,我们把这种主要靠空穴导电的半导体称为P型半导体。空穴称为多数载流子,电子为少数载流子。

另外,杂质电离后成为负离子,产生一个空穴;本征激发电子和空穴成对出现,所以在P型半导体中空穴数目等于负离子和电子数目之和。空穴带正电,电子和负离子带负电,整块半导体中正负电荷量相等,保持电中性。

综上所述:

(1)本征半导体中掺入五价元素,形成N型半导体。N型半导体中,电子是多数载流子,空穴是少数载流子,此外还有不能参与导电的正离子。

(2)本征半导体中掺入三价元素,形成P型半导体。P型半导体中,空穴是多数载流子,电子是少数载流子,此外还有不能参与导电的负离子。

(3)杂质半导体中,存在有主要由杂质电离产生的载流子,还有由本征激发产生的电子—空穴对。多子的浓度取决于杂质的浓度,少子的浓度取决于本征激发,与温度有关。

### 三、PN 结

把P型和N型半导体紧密地结合起来,在两者的交界面处将形成一个特殊的带电薄层,这个带电薄层就是PN结。PN结是半导体

器件的基础，所以要了解半导体器件的工作原理和特性，首先要熟悉PN结的原理和特性。

### 1. PN结的形成

P型和N型半导体紧密地结合在一起时，在交界面两侧有明显的载流子浓度差。把N型半导体一侧称为N区，P型半导体一侧称为P区。N区的电子浓度比P区的电子浓度高；P区的空穴浓度比N区的空穴浓度高。载流子在浓度差的作用下，向浓度低的方向运动，称为扩散运动。载流子扩散运动形成的电流称为扩散电流，它的大小与载流子的浓度差成正比，与载流子的浓度无关。由于浓度差的存在，N区的多子—电子要向P区扩散；P区的多子—空穴要向N区扩散。那么，这种扩散是否能持续到两边的电子和空穴浓度分布均匀为止呢？不是的，因为电子和空穴都是带电粒子，当N区靠近交界面处的电子进入P区后就会在N区留下一个不能移动的正离子；同样，P区的空穴进入N区后就会在P区留下一个不能移动的负离子。于是，在交界面两侧形成一个很薄的正、负离子层，N区一侧带正电，P区一侧带负电，称为空间电荷区，如图1-3所示。空间电荷区形成后，由于正负电荷互相作用，形成一个电场，称为内建电场，用 $e_{内}$ 表示，其方向是由N区指向P区的。这个内建电场对多数载流子的扩散运动有阻碍作用，但在内建电场的作用下，少数载流子（N区的空穴向P区，P区的电子向N区）作定向运动，这种在电场力的作用下载流子的定向运动称为漂移运动。载流子漂移运动形成的电流称为漂移电流，其大小与载流子的浓度和电场强度成正比。

开始时，内建电场较弱，多数载流子的扩散运动占优势。随着扩散的进行，空间电荷数量增加，空间电荷区变厚，内建电场增强。多数载流子的扩散运动减弱，少数载流子的漂移运动增强。当多子的扩散运动与少子的漂移运动平衡时，空间电荷数量不再增加，空间电荷区的厚度相对稳定，内建电场达到稳定值，PN结达到平衡状态。所以，PN结是载流子扩散运动与漂移运动平衡的产物。

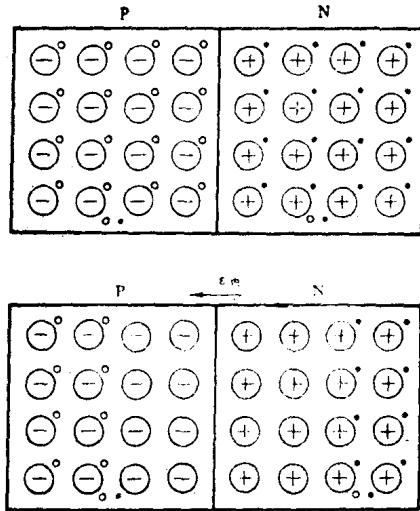


图 1-3 PN结的形成

空间电荷区是缺少载流子的高阻区，近似地认为载流子被“耗尽”，剩下不能移动的正、负离子，因此空间电荷区又称为耗尽区。

内建电场的形成，说明空间电荷区两边电位不等，N区电位比P区高。这个电位差称为接触电位差或电位壁垒（简称位垒）。位垒对多子的扩散有阻碍作用，所以空间电荷区又被称为阻挡层或位垒区。位垒用 $U_j$ 表示，其大小与半导体材料、掺杂浓度和温度有关。通常：

$$\text{硅 } U_j = 0.6 \sim 0.8 \text{ V}$$

$$\text{锗 } U_j = 0.2 \sim 0.3 \text{ V}$$

总之，在P型和N型半导体界面处，由于载流子的浓度差而产生多子的扩散运动。扩散的结果形成空间电荷区，形成内建电场。内建电场阻碍多子的扩散运动，使少子产生漂移运动。多子的扩散运动与少子的漂移运动平衡时，通过交界面的净载流子数为零，内建电场达到稳定值，PN结达到平衡状态。

## 2. PN结的单向导电性

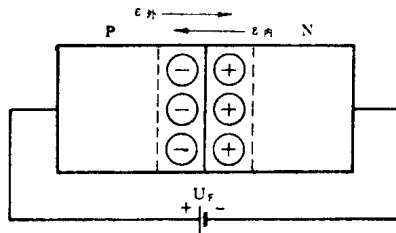
PN结单向导电性，就是在P区接电源的正极，N区接电源的负极时，有一定的电流流过。外加电压升高，流过PN结的电流迅速增大；当P区接电源负极，N区接电源正极时，流过PN结的电流却很微小，且电流的数值基本上不随外加电压变化。

P区接电源正极，N区接电源负极的运用方式，称为PN结正向运用或正偏。P区接电源负极，N区接电源正极的运用方式，称为PN结反向运用或反偏。

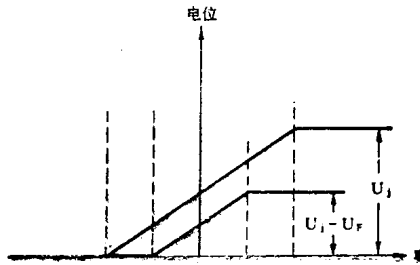
### (1) PN结外加正向电压

PN结未加电压时，处于平衡状态。多数载流子的扩散运动与少数载流子的漂移运动相对平衡，流过PN结的电流为零。

当PN结外加正向电压 $U_F$ 时，由于空间电荷区是高阻区，所以外加电压大部份降在空间电荷区上，建立一个外加电场 $e_{外}$ ，如图1-4(a)所示。



(a)



(b)

图 1-4 PN结外加正向电压



外加电场 $e_{外}$ 的方向与内建电场 $e_{内}$ 方向相反，抵消部分内建电场，使位垒降低为 $U_j - U_r$ ，如图1-4(b)所示。破坏了PN结原来的平衡状态，多子的扩散运动强于少子的漂移运动，形成较大的正向电流。PN结呈（低阻）导通状态。

外加正向电压时，PN结电流的形成如图1-5所示。图(a)表示PN结外加正向电压 $U_r$ 时，空间电荷区变薄，位垒降低。图(b)为PN结中性区内载流子浓度分布曲线。图(c)为流载子运动与PN结正向电流形成示意图。

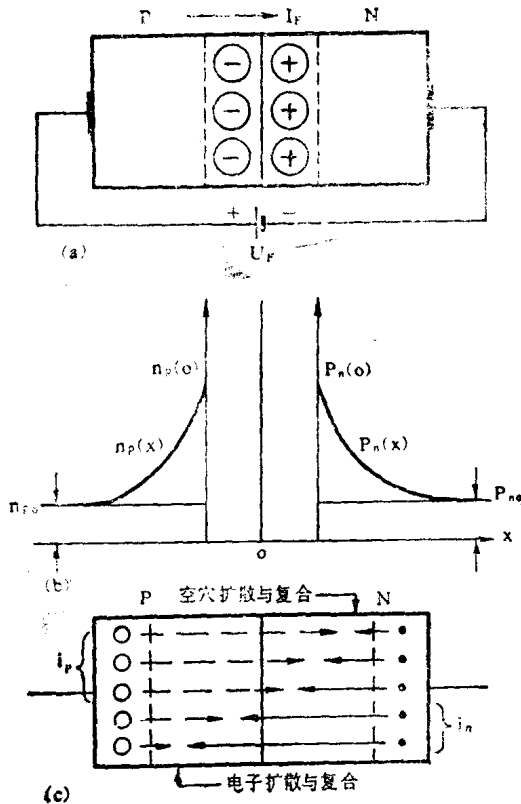


图 1-5 外加正向电压时PN结电流的形成