

高等医学院校教材  
供医学影像学专业使用

# 医学电子学基础与 医学影像物理学

主编：吴 杰 周建莉

高等医学院校教材  
供医学影像学专业使用

# 医学电子学基础与 医学影像物理学

主 编 吴 杰 周建莉

副主编 陈 平 邬志韧

编 委 (以姓氏笔画为序)

王 勇 陈 平 吴 杰 邬志韧 杨皖君

周建莉 高泽利 蒋 薇

图书在版编目 (CIP) 数据

医学电子学基础与医学影像物理学/吴杰, 周建莉  
主编. --昆明: 云南大学出版社, 2014  
ISBN 978 - 7 - 5482 - 1926 - 2

I. ①医… II. ①吴… ②周… III. ①医用电子学②  
影象诊断—医用物理学 IV. ①R312②R445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 032032 号

## 医学电子学基础与医学影像物理学

主编 吴杰 周建莉

---

策划编辑: 徐 曼  
责任编辑: 徐 曼  
封面设计: 周 旸  
出版发行: 云南大学出版社  
印 装: 昆明研汇印刷有限责任公司  
开 本: 787mm × 1092mm 1/16  
印 张: 14.25  
字 数: 356 千  
版 次: 2014 年 3 月第 1 版  
印 次: 2014 年 3 月第 1 次印刷  
书 号: ISBN 978 - 7 - 5482 - 1926 - 2  
定 价: 32.00 元

---

社 址: 云南省昆明市翠湖北路 2 号云南大学英华园内  
邮 编: 650091  
电 话: 0871 - 65033244 65031071  
网 址: <http://www.ynup.com>

## 内容简介

本书分为上篇医学电子学基础和下篇医学影像物理学两大部分。其中，医学电子学基础包括基本放大电路、生物医学常用放大器、集成运算放大器、振荡电路、直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路和触发器及时序逻辑电路共七章；医学影像物理学包括 X 射线物理、X 射线影像、磁共振原理、磁共振成像、超声物理和超声成像共六章。本教材的编写是在高等医学院校课程改革背景下完成的，本着实用性的原则力求在有限的学时内尽可能多的向学生介绍医学影像专业必备的电子学和成像机理方面的基础知识，以便学生能更加深入地理解和分析医学图像，更为合理地使用成像设备。

本书主要供医学影像学 and 医学影像设备学专业学生使用，也可作为影像专业研究生和临床医学各专业学生选修课教材。

# 目 录

## 上篇 医学电子学基础

第一章 基本放大电路 .....	(1)
第一节 晶体二极管 .....	(1)
一、半导体的导电特性 .....	(1)
二、PN 结的形成及其导电特性 .....	(3)
三、晶体二极管及其特性 .....	(4)
四、晶体二极管的主要参数 .....	(5)
五、稳压二极管 .....	(6)
第二节 晶体三极管 .....	(7)
一、三极管的结构及类型 .....	(7)
二、晶体三极管的工作原理 .....	(7)
三、晶体三极管的特性曲线 .....	(8)
四、晶体三极管的主要参数 .....	(10)
第三节 基本放大电路 .....	(11)
一、放大电路的基本概念 .....	(11)
二、基本放大电路 .....	(13)
三、放大电路性能指标的计算 .....	(16)
四、静态工作点稳定电路 .....	(18)
五、多级放大电路 .....	(20)
习题一 .....	(23)
第二章 生物医学常用放大器 .....	(25)
第一节 生物电信号的特点 .....	(25)
一、生物电信号的基本特征 .....	(25)
二、生物医学放大器的基本要求 .....	(26)
第二节 负反馈放大器 .....	(27)
一、反馈的概念 .....	(27)
二、负反馈的基本类型 .....	(28)
三、负反馈对放大器性能的影响 .....	(31)
第三节 直流放大器 .....	(35)

一、直流放大器的零点漂移 .....	(35)
二、差分放大器 .....	(35)
第四节 功率放大器 .....	(41)
一、功率放大器的特点和分类 .....	(41)
二、互补对称功率放大器 .....	(43)
习题二 .....	(45)
<b>第三章 集成运算放大器</b> .....	(47)
第一节 集成运放的组成与性能 .....	(47)
一、集成运放的电路组成 .....	(47)
二、集成运算放大器的主要性能指标 .....	(48)
三、集成运放的理想模型及传输特性 .....	(49)
第二节 基本放大电路 .....	(50)
一、反相比例运算放大器 .....	(50)
二、同相比例运算放大器 .....	(50)
三、加减运算放大器 .....	(51)
第三节 电压比较器 .....	(52)
第四节 集成运算放大器的医学应用 .....	(53)
一、测量放大器电路 .....	(53)
二、心电示波器的前置放大电路 .....	(54)
习题三 .....	(54)
<b>第四章 振荡电路</b> .....	(56)
第一节 自激振荡的基本原理 .....	(56)
一、自激振荡的基本条件 .....	(56)
二、正弦波振荡器基本组成 .....	(57)
三、振荡的建立和稳定 .....	(57)
第二节 文氏桥式 $RC$ 振荡器 .....	(57)
一、 $RC$ 串并联网络的选频特性 .....	(58)
二、振荡的建立与稳幅措施 .....	(59)
第三节 $LC$ 正弦波振荡电路 .....	(59)
一、变压器反馈式振荡电路 .....	(60)
二、电感三点式 $LC$ 振荡电路 .....	(60)
三、电容三点式 $LC$ 振荡电路 .....	(61)
习题四 .....	(62)
<b>第五章 直流稳压电源</b> .....	(63)
第一节 整流与滤波 .....	(63)
一、整流电路 .....	(63)

二、滤波电路 .....	(67)
第二节 晶体管直流稳压电源 .....	(69)
一、稳压管稳压概念 .....	(69)
二、串联型晶体管直流稳压电路 .....	(70)
三、常用线性集成稳压器 .....	(70)
习题五 .....	(71)
<b>第六章 门电路与组合逻辑电路 .....</b>	<b>(73)</b>
第一节 数字电路概述与计数制 .....	(73)
一、数字电路 .....	(73)
二、进位计数制 .....	(73)
第二节 逻辑门电路 .....	(76)
一、基本门电路 .....	(76)
二、基本逻辑门电路的组合 .....	(80)
三、集成门电路 .....	(82)
第三节 逻辑代数及其在逻辑电路中的应用 .....	(84)
一、逻辑代数概述 .....	(84)
二、逻辑函数式与组合逻辑电路 .....	(84)
三、逻辑代数的基本定律及其应用 .....	(85)
习题六 .....	(87)
<b>第七章 触发器及时序逻辑电路 .....</b>	<b>(89)</b>
第一节 触发器 .....	(89)
一、基本 RS 触发器 .....	(89)
二、同步 RS 触发器 .....	(91)
三、边缘 D 触发器 .....	(93)
第二节 移位寄存器 .....	(94)
一、“串入-并出”移位寄存器 .....	(94)
二、“并入-串出”移位寄存器 .....	(96)
三、移位寄存器在人体生理信号串行通信系统中的应用 .....	(96)
习题七 .....	(98)
<b>下篇 医学影像物理学</b>	
<b>第八章 X 射线物理 .....</b>	<b>(99)</b>
第一节 X 射线的产生 .....	(99)
一、X 射线管 .....	(99)
二、X 射线的产生机制 .....	(102)
第二节 X 射线与物质的相互作用 .....	(104)

一、光电效应 .....	(105)
二、康普顿效应 .....	(106)
三、电子对效应 .....	(107)
四、各种相互作用的重要性 .....	(107)
第三节 X 射线在物质中的衰减 .....	(108)
一、X 射线衰减的因素 .....	(108)
二、X 射线衰减的规律 .....	(109)
三、X 射线的滤过 .....	(110)
第四节 X 射线在人体内的衰减 .....	(111)
一、人体的物质组成 .....	(111)
二、X 射线在人体内的衰减 .....	(112)
习题八 .....	(112)
<b>第九章 X 射线影像 .....</b>	<b>(114)</b>
第一节 模拟 X 射线影像 .....	(114)
一、普通 X 射线摄影 .....	(114)
二、特殊 X 射线摄影 .....	(115)
第二节 数字 X 射线影像 .....	(117)
一、数字图像基础知识 .....	(117)
二、数字减影血管造影 .....	(118)
三、数字 X 射线摄影 .....	(122)
第三节 X 射线计算机断层成像 .....	(124)
一、X-CT 的基础知识 .....	(125)
二、X-CT 的后处理技术 .....	(130)
三、螺旋 CT .....	(133)
习题九 .....	(137)
<b>第十章 磁共振原理 .....</b>	<b>(139)</b>
第一节 原子核的磁性 .....	(139)
一、原子核的自旋角动量 .....	(139)
二、原子核的自旋磁矩 .....	(140)
三、核磁矩在静磁场中的势能 .....	(141)
四、核磁矩在静磁场中的旋进 .....	(142)
五、原子核的宏观描述 .....	(143)
第二节 磁共振 .....	(144)
一、磁共振的条件 .....	(144)
二、磁共振的宏观表现 .....	(145)
三、弛豫过程和弛豫时间 .....	(147)
习题十 .....	(150)



第十一章 磁共振成像 .....	(151)
第一节 磁共振信号与加权图像 .....	(151)
一、自由感应衰减信号 .....	(151)
二、自旋回波 .....	(152)
三、反转恢复信号 .....	(155)
第二节 磁共振图像的重建 .....	(156)
一、频率与相位 .....	(156)
二、梯度磁场 .....	(157)
三、层面选择 .....	(157)
四、相位编码和频率编码 .....	(158)
五、 $k$ 空间 .....	(160)
六、二维傅里叶变换 .....	(163)
第三节 快速成像序列 .....	(165)
一、快速自旋回波 .....	(165)
二、梯度回波序列 .....	(166)
三、回波平面成像 .....	(167)
第四节 磁共振技术在临床中的应用 .....	(169)
一、MRI 造影剂 .....	(169)
二、磁共振血管成像 .....	(169)
三、磁共振功能成像 .....	(169)
四、扩散成像 .....	(170)
五、灌注成像 .....	(170)
第五节 MRI 质量保证 .....	(170)
一、信噪比 (SNR) .....	(170)
二、空间分辨率 .....	(171)
三、低对比度分辨力 .....	(171)
四、伪影 .....	(171)
习题十一 .....	(174)
第十二章 超声物理 .....	(175)
第一节 超声波的基本性质 .....	(175)
一、超声波的产生与接收 .....	(175)
二、超声波的分类 .....	(177)
三、描述超声场的基本参量 .....	(178)
第二节 圆形晶片声源的超声场 .....	(180)
一、圆形单晶片探头轴线上声压的分布 .....	(181)
二、超声场的角分布 .....	(182)
第三节 超声波在介质中的传播特性 .....	(184)
一、超声波在大界面上的反射与透射 .....	(184)

二、衍射与散射 .....	(190)
三、超声波在介质中的衰减规律 .....	(191)
第四节 多普勒效应 .....	(192)
一、超声的多普勒效应 .....	(193)
二、多普勒频移 .....	(194)
三、多普勒血流测量 .....	(195)
习题十二 .....	(196)
<b>第十三章 超声成像</b> .....	(197)
第一节 超声成像的基本原理 .....	(197)
一、超声回波所携带的信息 .....	(197)
二、超声成像的物理假定 .....	(198)
第二节 A型与M型超声成像 .....	(201)
一、A型超声成像 .....	(201)
二、M型超声成像 .....	(202)
第三节 B型超声成像 .....	(202)
一、灰度调制式断面图像的形成 .....	(203)
二、B型超声成像中的电子扫描 .....	(203)
三、B型超声成像中的图像处理 .....	(205)
四、B超图像的空间分辨率 .....	(207)
第四节 频谱多普勒成像原理 .....	(207)
一、脉冲多普勒 .....	(208)
二、连续多普勒 .....	(209)
三、频谱分析与显示 .....	(209)
四、频谱多普勒成像中的伪像 .....	(211)
第五节 彩色多普勒血流成像 .....	(212)
一、多道距离选通测量 .....	(212)
二、自相关技术 .....	(213)
三、信号输出的显示方式 .....	(214)
习题十三 .....	(215)
<b>参考文献</b> .....	(216)

改进以后，半导体的存在才真正被学术界认可。常用的半导体材料有锗、硅、砷化镓、磷化镓等。半导体之所以得到广泛的应用，是由于它具有独特的导电性能。

### 1. 本征半导体

完全纯净的半导体称为本征半导体 (intrinsic semiconductor)，如经过提纯的晶体硅和锗。它们每个原子的最外层都有 4 个价电子，分别与相邻原子的价电子形成共价键，如图 1-1 所示。在绝对零度时，这些价电子处于束缚状态，本征半导体中基本上没有自由电子，导电能力几乎为零，是绝缘体。在常温下，由于电子热运动，少数价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子，在原来的位置上留下“带正电”的空位，称为空穴 (Hole)。当某一空穴被附近的电子填补 (空穴与电子复合) 时，就在附近形成了新的空穴。所以，空穴和自由电子一样，都可以在半导体中自由移动。在本征半导体中，空穴和电子是成对出现的，在外电场的作用下空穴和自由电子均能定向运动，形成电流。从这个意义上来说，它们都是本征半导体的载流子。在一定温度下，电子-空穴对的产生和复合同时存在并达到动态平衡，此时半导体具有一定的载流子密度，从而具有一定的导电能力。温度升高时，电子热运动加剧，将产生更多的电子-空穴对，载流子密度增加，半导体的导电能力增加。

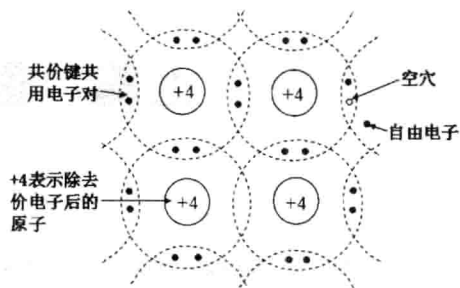


图 1-1 本征半导体

### 2. 杂质半导体

在本征半导体中，由于共价键的束缚，空穴或电子浓度较低，其导电能力很弱。为了增加本征半导体的导电能力，常在本征半导体内掺入微量合适的其他元素，这些掺入的元素称为杂质，参杂后的半导体称为杂质半导体，其导电能力可以增加很多。根据所掺杂质元素性质的不同，杂质半导体又分为 N 型 (negative type) 半导体和 P 型 (positive type) 半导体两种类型。

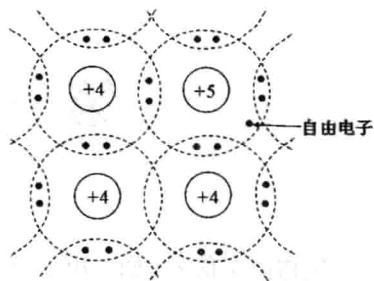


图 1-2 N 型半导体

#### (1) N 型半导体。

在本征半导体中掺入少量五价元素，如磷、锑等，即构成 N 型半导体。如图 1-2 所示，杂质原子在半导体中占据了原来由硅原子所占的位置，每一个五价原子与周围四价的半导体晶体原子组成共价键以后还多出一个价电子，这个价电子不受共价键束缚，很容易从五价原子中脱出成为自由电子，每一个五价原子都可以提供一个自由电子，这样，半导体中自由电子的浓度大大提高，导电能力增强。在这类半导体中，自由电子的数目远大于空穴数目，即自由电子是多数载流子 (简称多子)，空穴为少数载流子 (简称少子)。这种以自由电子导电为主，空穴导电为辅的半导体，称为 N (Negative) 型半导体或电子型半导体。

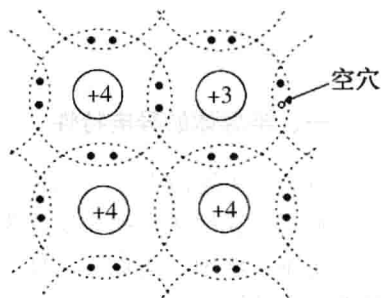


图 1-3 P 型半导体

#### (2) P 型半导体。

若在本征半导体中掺入少量的三价元素，如硼、镉

等，即构成 P 型半导体。如图 1-3 所示，杂质原子在半导体中占据了原来由硅原子所占的位置，由于每一个三价原子与周围四价的半导体原子组成共价键时缺少一个电子，便出现了一个空穴。在半导体晶体中每一个三价原子可提供一一个空穴，这样，半导体中空穴的浓度大大提高，导电能力增强。在这类半导体中，空穴的数目远大于自由电子数目，此时空穴为多数载流子，电子为少数载流子，这种以空穴导电为主，电子导电为辅的半导体称为 P (Positive) 型半导体或空穴型半导体。

## 二、PN 结的形成及其导电特性

### 1. PN 结的形成

当用一定的工艺方法把 P 型和 N 型半导体紧密地结合在一起的时候，就会在两者结合处形成一层带电的空间电荷区，称为 PN 结 (PN junction)。

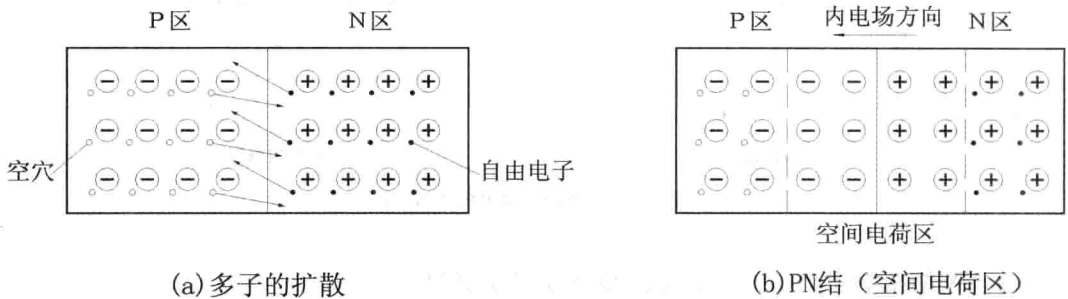


图 1-4 PN 结的形成

如图 1-4 所示，将 P 型半导体和 N 型半导体紧密结合在一起时，在它们的交界处，P 型区内的空穴浓度大，N 型区内的电子浓度大，由于浓度差的存在，自由电子和空穴均会从高浓度处向低浓度处扩散，即 N 型区内的自由电子向 P 型区内扩散，P 型区内的空穴向 N 型区内扩散，如图 1-4(a) 所示。进入 P 区的自由电子可能落入空穴，进入 N 区的空穴也可能捕获自由电子，使电子-空穴对同时消失，这种现象称为复合。扩散的结果，使 P 型区失去空穴留下不能移动的带负电的离子，N 型区失去电子留下不能移动的带正电的离子，这些不能移动的带电粒子分别集中在 P 型区和 N 型区的交界面两侧附近形成一层很薄的带电区域称为空间电荷区，在这个区域内，由于正负电荷的相互作用，形成了一个由 N 型区指向 P 型区的内部电场，如图 1-4(b) 所示。显然，内电场的作用是阻碍多数载流子的扩散，有利于少数载流子的运动 (称为漂移运动)，即 N 型区空穴向 P 型区漂移，P 型区电子向 N 型区漂移，漂移的结果使内电场减弱。在交界面发生的扩散和漂移是两种作用相反的运动，开始时，扩散运动占优势，随着内电场的建立和增强，漂移运动加强，当扩散运动和漂移运动强度相等，即多子的扩散数量和少子的漂移数量相等时，空间电荷区厚度不再变化，形成一个相对稳定的状态而达到动态平衡。处于动态平衡时的空间电荷区就是 PN 结。

### 2. PN 结的导电特性

在 PN 结两端加上极性不同的直流电压时，我们将看到其导电性能有很大的差异。

(1)PN 结两端加上正向电压时, PN 结处于导通状态。

如图 1-5(a)所示, 当 PN 结外加正向电压时, 由于电源的正极接 P 区, 负极接 N 区, 即外加电场方向与内电场方向相反, 因而削弱了内电场, 使空间电荷区变薄, 有利于多数载流子的扩散而不利于少数载流子的漂移, 于是 P 区和 N 区的多数载流子顺利通过 PN 结, 同时外电源正负两端又不断向半导体提供空穴和电子, 从而形成较大正向电流。这时 PN 结呈现导通状态, 维持导通状态所加的正向电压, 又称正向偏置, 简称正偏。PN 结在正向导通时, 呈现的电阻是很小的。

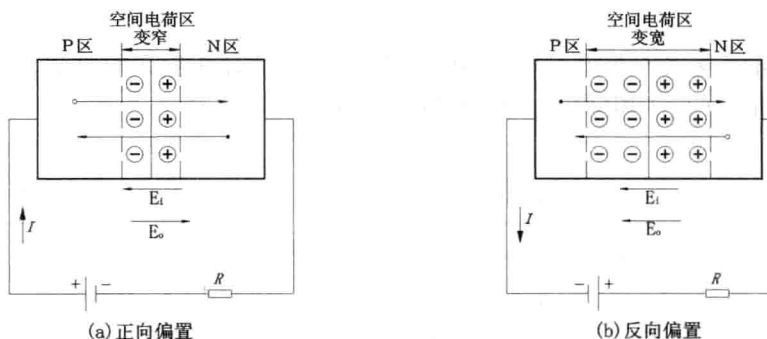


图 1-5 PN 结的单向导电性

(2)PN 结两端加上反向电压时, PN 结处于截止状态。

如图 1-5(b)所示, 给 PN 结加上反向电压, 即电源的正极接 N 区, 负极接 P 区, 此时 PN 结处于反向偏置状态, 简称反偏。由于外加电场方向与内电场方向相同, 加强了内电场, 使空间电荷区变厚, 有利于少数载流子的漂移而阻碍多数载流子的扩散, 几乎没有多数载流子能通过 PN 结, 而少数载流子的漂移形成的反向电流很小, 近似为零, 可以认为此时 PN 结处于截止状态。PN 结在反向截止时, 呈现的电阻是很大的。

正向偏置时, PN 结处于导通状态; 反向偏置时, PN 结处于截止状态, 这一特性称为 PN 结的单向导电性。单向导电性是 PN 结最基本也是最重要的电特性。

### 三、晶体二极管及其特性

#### 1. 晶体二极管的结构

晶体二极管, 简称二极管(diode), 就是在一个 PN 结两端分别引出相应的电极, 用管壳封装而成的, 由 P 区引出的电极称为阳极或正极, 由 N 区引出的电极称为阴极或负极。晶体二极管的基本结构、电路符号如图 1-6 所示。电路符号中三角箭头的指向即为晶体二极管正向电流的方向。二极管按照材料可以分为硅二极管和锗二极管两种类型。

#### 2. 晶体二极管的伏安特性

晶体二极管, 其本质就是一个 PN 结, PN 结的结构特点决定了它具有单向导电的特性。二极管两端的电压  $U$  与通过二极管的电流  $I$  之间的关系称为二极管的伏安特性, 常用图 1-7 所示的伏安特性曲线来描述, 它反

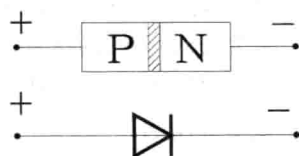


图 1-6 二极管的结构与电路符号

映了晶体二极管的导电特性。由图可见，二极管伏安特性是非线性的，其正、反向导电性能有很大的差别。

### (1) 正向特性。

在正向电压很低时，因为外电场不足以克服 PN 结内电场，多数载流子的扩散运动受阻，通过二极管的正向电流很小（几乎为零），这个区域称为“死区”。当正向电压超过某一电压值  $U_{on}$  后，正向电流随正向电压的增加迅速增大，此时，二极管呈现导通状态。 $U_{on}$  称为死区电压或开启电压。死区电压的大小与制作二极管的材料有关。在室温下，硅二极管的死区电压约为 0.5V，锗二极管约为 0.1V。正向导通后，在正常使用的电流范围内，二极管的正向电压很小，且几乎维持恒定，硅管约为 0.6~0.8V（通常取 0.7V），锗管约为 0.2~0.3V（通常取 0.2V）。

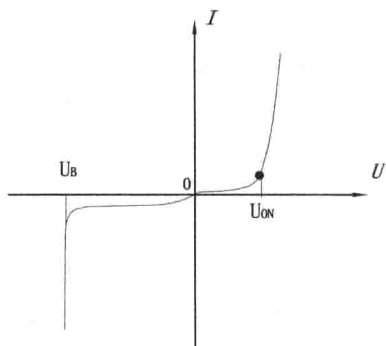


图 1-7 二极管的伏安特性曲线

### (2) 反向特性。

在外加反向电压时，有极小的反向电流通过二极管，而且基本上不随反向电压的变化而变化。这是因为反向电流是少数载流子在反向电压作用下的漂移运动形成的，在一定的温度下，单位时间内能产生的少数载流子数目基本稳定，只要内电场的漂移作用使它们都越过 PN 结形成反向电流，即使内电场再增强一些，也不能使载流子的数目增加，所以反向电流近似为零，且不随反向电压而变化。这种电流称为反向饱和电流  $I_R$ 。当温度上升时，少数载流子的数目随之增加，反向饱和电流也将急剧上升。硅管的反向电流比锗管小许多倍，一般硅管的  $I_R$  在几十微安以下，锗管则可达几百微安。

由二极管的正向和反向特性可明显地看出，二极管是非线性器件且具有单向导电性。

### (3) 反向击穿特性。

当反向电压不断增加并超过某一数值时，反向电流突然剧增，此时，二极管将失去单向导电性，这种现象称为二极管的反向击穿，相应的电压称为反向击穿电压。这是因为在反向电压超过一定数值后，共价键内的价电子将被电场强行拉出来，因而载流子的数目增加，这些载流子被电场加速而获得能量后又会与其他原子发生碰撞产生新的载流子。这样的连锁反应将造成载流子数目的迅速增加，从而使反向电流急剧上升。发生反向击穿时，PN 结中将有很大的反向电流通过，不仅二极管的单向导电性被破坏，甚至因电流过大过热而将二极管烧毁。因此，普通二极管是不允许工作在反向击穿区的，为防止反向击穿造成二极管的永久性损坏，电路中一般应接入适当大小的限流电阻。各类二极管的反向击穿电压大小不等，通常为几十伏到几百伏，最高可达千伏以上。

## 四、晶体二极管的主要参数

二极管的参数是表征二极管性能和适用范围的技术指标，是合理选用和正确使用二极管的依据，一般可以从有关手册中查到。晶体二极管的主要参数有：

(1) 最大整流电流。是指二极管长时间工作时允许通过的最大正向电流的平均值。它决定于制作二极管的材料及二极管的散热情况。使用时不能超过此值，以免二极管因过热

而损坏。

(2)最高反向工作电压。是为保证二极管能正常工作而设定的极限反向电压。一般为反向击穿电压的一半。

(3)反向饱和电流。是评价二极管质量的指标之一。它是指二极管未被击穿前的最大反向电流,有时也称为二极管的反向漏电流。其值愈小说明二极管的单向导电性愈好。

(4)最高工作频率。二极管正常工作的上限频率,超过此值,二极管的单向导电性能变差,甚至会失去单向导电性。

除了以上参数外,最高和最低使用温度,最大瞬时电流等应用时也需要注意。

在使用二极管时,要保证所选的管子能安全可靠地工作,也就是被选用的管子在使用时不能超过它的极限参数,如最大整流电流、最高反向工作电压、最高工作频率等,并且要留有相当的余量。

## 五、稳压二极管

稳压二极管(Zenerdiode)简称稳压管,是一种经过特殊工艺制成的晶体二极管。在直流稳压电路中获得广泛应用,它与普通晶体二极管的区别在于它工作在反向击穿区,而不是正向导通区,而且这种反向击穿是可逆的。

### 1. 稳压管的伏安特性

稳压二极管是一种用特殊工艺制成的硅二极管,其伏安特性与普通二极管类似,只是稳压管的反向击穿区特性曲线很陡,稳压二极管的电路符号和伏安特性如图1-8所示。

从反向特性曲线上可以看到,当反向电压达到击穿电压 $U_Z$ 时,反向电流突然增大,稳压管被反向击穿,但这种击穿不是破坏性的,只要在电路中串联一个合适的限流电阻,就能使稳压管工作在反向击穿状态而不会遭到永久性的破坏(称为电击穿)。电击穿状态下,通过管子的电流可在较大的范围内变化,而稳压管两端的反向电压几乎不变。利用这一特性,可使稳压管在电路中起到稳压作用。

### 2. 稳压管的主要参数

(1)稳定电压:稳压管正常工作时,即反向击穿后稳压管两端的电压。由于工艺问题,同一型号的稳压管的稳定电压也不完全相同,而存在一定的分散性,如2CW18稳压管的稳压值为10~12V。

(2)稳压电流。稳压效果较好的工作电流,其值可以从有关手册上查到。

(3)动态电阻:稳压管正常工作时,稳压管两端电压的变化量与相应电流的变化量的比值,即

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1-1)$$

动态电阻是衡量稳压管稳压性能好坏的指标。显然, $r$ 愈小,稳压管的反向击穿伏安特性曲线愈陡,稳压管的稳压性能愈好。

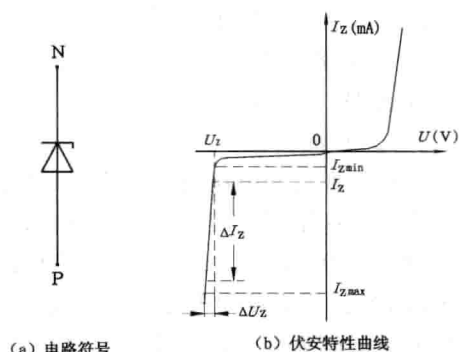


图1-8 稳压二极管

除了以上参数外，最大允许耗散功率和电压温度系数也需要注意。

## 第二节 晶体三极管

晶体三极管(Transistor)简称晶体管或三极管(Triode)。它是在同一块半导体上，通过一定的工艺制作两个紧密结合的PN结，再分别引出三个电极，然后封装加固而成的。由于两个PN结的相互作用，而表现出不同于单个PN结的特性。晶体管是各种电子电路的核心部件，它的出现彻底改变了电子线路的结构，集成电路以及大规模集成电路应运而生，使电子技术得以飞跃发展。

### 一、三极管的结构及类型

晶体三极管的基本结构是两个反向连接的PN结，可有PNP和NPN两种组合。由于三极管的结构和外形特征，它有三个接出来的端点，所以便被形象地命名为三极管。图1-9(a)、(b)即为两种不同类型三极管的结构和电路符号。

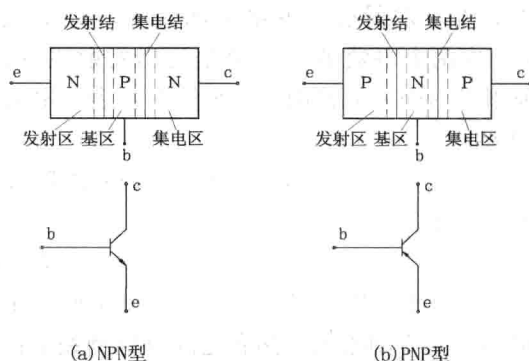


图1-9 三极管的结构示意图和电路符号

由图可见，无论是PNP型管，还是NPN型管，均可以分为三个区，分别称为发射区、基区和集电区，发射区和集电区都是同种类型的半导体材料(P型或N型)。发射区和基区间的PN结称为发射结，集电区和基区间的PN结称为集电结。从三个区分别引出的三根电极，分别称为发射极e(emitter)、基极b(base)和集电极c(collector)，名称的命名和它们在三极管操作时的功能有关。

在制作时，基区层总是做得很薄，约几微米至几十微米，而且杂质浓度很低。发射区的掺杂浓度要大于集电区的掺杂浓度，以便发射更多的载流子。集电区的面积做得较大，以便收集载流子。

在三极管的电路符号中，发射极被特别标出，发射极箭头方向表示发射结正偏时发射极电流的实际方向，箭头向外的是NPN型晶体管，箭头向里的是PNP型晶体管。

### 二、晶体三极管的工作原理

#### 1. 晶体管放大的偏置电路

三极管在内部结构上具有发射区掺杂浓度高、基区很薄而且浓度低、集电结面积大的特点，这些特点是保证三极管具有电流放大作用的内部条件。三极管在实际的放大电路中使用，还需要加合适的偏置电路。由于三极管发射结的非线性(相当于一个二极管)，基极电流必须在输入电压大到一定程度后才能产生(对于硅管，常取0.7V)。如果不加偏置的话，过小的信号就不足以引起基极电流的改变(因为小于0.7V时，基极电流都是0)。如果我们事先在三极管的基极上加上一个合适的电流(叫做偏置电流)，那么当一个小信号跟这个偏置电流叠加在一起时，小信号就会导致基极电流的变化，而基极电流的变化，



就会被放大并在集电极上输出。

通过外部电源和电阻提供适当的直流偏置电压，使三极管的发射结正向偏置，集电结反向偏置，这是晶体三极管实现电流放大作用的外部偏置条件。对 NPN 型三极管而言，就是要求基极电势高于发射极电势，集电极电势高于基极电势，如图 1-10(a) 所示，即  $U_C > U_B > U_E$ ；而对 PNP 型三极管，极性正好相反，要求  $U_E > U_B > U_C$ ，偏置电路的具体接法如图 1-10(b) 所示。

## 2. 电流放大作用

晶体三极管有三个极，分别叫做集电极 c，基极 b，发射极 e。我们把从基极 b 流至发射极 e 的电流叫做基极电流  $I_B$ ；把从集电极 c 流至发射极 e 的电流叫做集电极电流  $I_C$ 。这两个电流的方向都是流出发射极的，所以发射极 e 上就用了一个箭头来表示电流的方向。

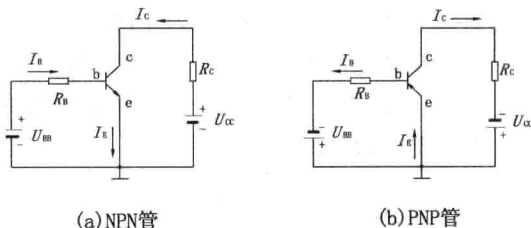


图 1-10 三极管放大的偏置电路

根据基尔霍夫第一定律，三极管发射极电流  $I_E$ 、集电极电流  $I_C$  和基极电流  $I_B$  三者满足下式关系：

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-2)$$

实际上，因为基区的掺杂浓度很低，在基区复合的电子很少，所以形成的基极电流  $I_B$  很小，而  $I_C$  则很大。两者之间有比例关系：

$$I_C = \beta I_B \quad (1-3)$$

式中比例系数  $\beta$  称为直流电流放大系数。 $I_C$  和  $I_B$  的变化量  $\Delta I_C$  和  $\Delta I_B$  之间也满足类似的关系：

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B \quad (1-4)$$

式中比例系数  $\beta$  称为交流电流放大系数。 $\beta$  和  $\beta$  的大小主要由基区的掺杂浓度和基区的厚度决定，在三极管制成以后，就固定了。

由于  $I_C \gg I_B$ ，当基极电流产生一个很小的变化  $\Delta I_B$  时，就会引起集电极电流产生一个很大的变化  $\Delta I_C$ 。集电极电流的变化量是基极电流变化量的  $\beta$  倍，即电流变化被放大了  $\beta$  倍，如果我们将一个变化的小信号加到基极跟发射极之间，这就会引起基极电流  $I_B$  的变化， $I_B$  的变化被放大后，导致了  $I_C$  很大的变化。即实现了电流的放大作用。

如果让集电极电流  $I_C$  流过一个电阻  $R$ ，那么根据欧姆定律  $U = I_C R$  可知， $I_C$  发生变化时，电阻上电压就会发生相应的变化。我们将这个电阻上的电压取出来，就得到了放大后的电压信号了。

## 三、晶体三极管的特性曲线

三极管外部各极电压和电流的关系曲线，称为三极管的特性曲线，又称伏安特性曲线。它不仅能反映三极管的质量与特性，还能用来定量地估算出三极管的某些参数，是分析和设计三极管电路的重要依据。下面以 NPN 型共发射极电路为例，介绍晶体三极管的特性曲线。由于三极管有三个电极，有输入端、输出端和公共端之分，故将特性曲线对应分为输入特性和输出特性两种。