

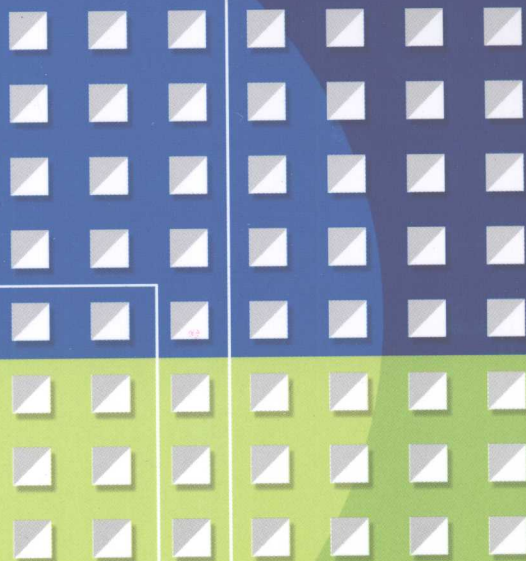


高等学校“十一五”精品规划教材

电子技术

主 编 任振辉 张义华

DIANZI JISHU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校“十一五”精品规划教材

电子技术

主 编 任振辉 张义华
副主编 邹彩虹 刘振宇 包 峰



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分七章，主要内容包括：常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流电源、电力电子器件及应用、门电路及组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路。每章均有典型例题和习题。

本书参考学时为 40~60 学时，可作为高等院校非电类专业本科、专科、高职用电子技术教材，也可供有关工程技术人员学习与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术 / 任振辉, 张义华主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6405 - 3

I. 电… II. ①任…②张… III. 电子技术-高等学校-教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 049400 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 电子技术
作 者	主编 任振辉 张义华
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 13.75 印张 326 千字
版 次	2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是在全国高等院校电学科教材研究会的指导下编写的，是高等学校“十一五”精品规划教材之一。本书的基本内容符合全国高等院校电学科教材研究会审定的《电子技术》课程教学大纲，可作为高等院校非电类专业本科、专科、高职用电子技术教材，也可供有关工程技术人员学习与参考。

在本书的编写过程中，编者总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验，注重理论的系统性和实用性，删除了以往陈旧过时或不适用的内容，增补了新的知识和技术，修改了对一些问题的分析思路和解答方法，使之更适合于组织教学和学生自学。书中例题、习题丰富，图形、符号均采用最新国家标准。在编写过程中，编者借鉴和参考了书后所列参考文献，在本书出版之际，向文献的作者致以衷心的感谢。

参加本书编写的单位有：河北农业大学、河南农业大学、山西农业大学、华北电力大学、石家庄铁道学院、河北经贸大学、河北科技师范学院、保定电力职业技术学院、保定职业技术学院、河北软件职业技术学院、河北工业职业技术学院等院校。

参加本书编写的人员有：任振辉、张义华、邹彩虹、刘振宇、包峰、宋慧欣、刘扬、刘永福、刘雅举、宋冬冬、苏海锋、王学军、张丽娟、马永鹏。全书由河北农业大学任振辉负责统稿、校审和定稿。

由于编者水平有限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2009年2月

目 录

前言

第一章 常用半导体器件	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 半导体二极管	5
第三节 特殊二极管	8
第四节 半导体三极管	10
第五节 场效应管	15
小结	23
习题	24
第二章 基本放大电路	26
第一节 放大电路概述	26
第二节 共发射极放大电路	28
第三节 静态工作点稳定的放大电路	37
第四节 共集电极放大电路	41
第五节 多级放大电路	45
第六节 功率放大电路	48
第七节 场效应管放大电路	53
小结	57
习题	57
第三章 集成运算放大器	62
第一节 集成运算放大器简介	62
第二节 具有负反馈的线性集成运算放大器	67
第三节 集成运算放大器的应用	80
第四节 使用集成运算放大器时应注意的问题	95
小结	95
习题	97
第四章 直流电源	103
第一节 整流电路	103
第二节 滤波电路	107
第三节 稳压电路	110
第四节 开关型稳压电路	117
小结	119
习题	119

第五章 电力电子器件及应用	122
第一节 常用电力电子器件	122
第二节 可控整流电路	128
第三节 晶闸管触发电路	134
第四节 逆变电路	139
第五节 交流电力控制电路	142
第六节 变频电路	144
小结	147
习题	148
第六章 门电路及组合逻辑电路	150
第一节 数字电路概述	150
第二节 门电路	152
第三节 逻辑函数及其表示方法	158
第四节 逻辑函数的化简方法	160
第五节 组合逻辑电路的分析与设计	166
第六节 常用集成组合逻辑电路	170
小结	174
习题	175
第七章 触发器及时序逻辑电路	177
第一节 双稳态触发器	177
第二节 时序逻辑电路的分析方法	182
第三节 常用时序逻辑功能器件	185
第四节 电平转换电路	192
第五节 555 定时器	195
第六节 D/A 转换和 A/D 转换的基本概念	199
小结	203
习题	204
附录 A 半导体器件的型号命名方法	206
附录 B 半导体器件的型号组成部分的符号及其意义	207
附录 C 常用半导体器件参数	208
参考文献	211

第一章 常用半导体器件

半导体器件是由半导体材料制成的电子器件，是构成电子线路的核心。常用半导体器件有二极管、三极管、场效应管及各种集成电路。本章首先介绍半导体的基本知识，随后重点讨论二极管、三极管和场效应管的结构、特性及简单应用。

第一节 半导体的基本知识

一、半导体概述

世界是由物质构成的。根据导电能力的强弱，物质可分为导体、绝缘体和半导体三大类。导电能力强的物质叫导体，如金、银、铜、铝等金属材料都是导体。导电能力弱的物质叫绝缘体，如橡胶、塑料、陶瓷等。导电能力介于导体与绝缘体之间的物质叫半导体，常用的半导体材料有硅、锗、硒及许多金属氧化物和硫化物等。

半导体的导电能力会随外界条件的不同而改变。例如：有些半导体的导电能力对温度的反应灵敏，温度愈高，导电能力愈强。利用这一特性，半导体可用做热敏元件。有些半导体的导电能力随光照（辐射能）的改变而变化，光照愈强，导电能力愈强。利用这一特性，半导体可以用做光敏元件。此外，在纯净的半导体中加入微量的杂质（指其他元素），它的导电能力会显著增强。利用这一特性，可制造出各种半导体器件，如二极管、三极管、场效应管及可控硅等。正是由于半导体导电性能的这种“可控性”，使得半导体材料在近代电子技术中大放异彩。半导体独特的导电性取决于其特殊的内部结构及导电机理。

二、半导体中的载流子

载流子是指物质内部运载电荷的粒子。物质导电能力的强弱与其内部的原子结构和载流子的数量有关。物质内部载流子愈多，导电能力愈强。金属材料中虽然只有一种载流子——自由电子，但其数量多，所以导电能力强。

常用半导体材料硅和锗的原子结构如图 1-1 所示，它们的特点是原子最外层的电子都是四个。原子最外层的电子称为价电子。有几个价电子就称该原子为几价元素，所以硅和锗都是四价元素。

硅和锗等半导体材料都是晶体结构。在一般情况下，晶粒中的原子排列虽然是整齐的，但从整块晶体来说，每个晶粒的方向（称为取向）彼此不同，所以原子的排列还是无规律和不整齐的，这种晶体称为多晶体。一般来说，多晶体不能制作半导体器件。如果把多晶体用一种半导体工艺“拉成”单晶体，使它的原子排列由无规律和不整齐的状态变成有规律和整齐的状态，那么这种单晶体就可以制作半导体器件。

图 1-2 为硅单晶原子排列示意图。硅原子的

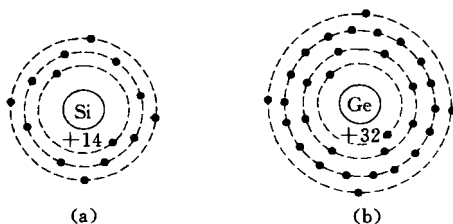


图 1-1 硅和锗原子结构示意图

(a) 硅原子结构；(b) 锗原子结构

最外层有四个价电子，从原子结构理论可知，最外层有八个价电子才是稳定状态。因此硅原子组成晶体时，每个原子都要共享四周相邻原子的四个价电子，才能组成稳定状态。这样每相邻两个原子都共有一对电子，称为“共有电子对”。电子对中的任何一个电子，既围绕自身原子核运动，也出现在相邻原子所属的轨道上，这样的组合称为共价键结构。

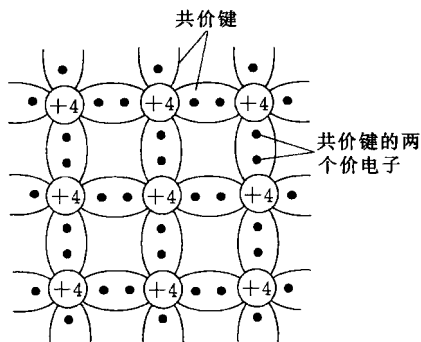


图 1-2 硅单晶原子排列示意图

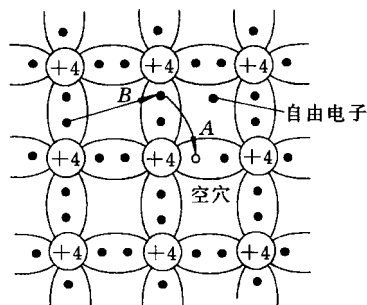


图 1-3 热运动产生的电子—空穴对

半导体硅、锗的外层共有电子在一定温度下，由于热运动转化为电子的动能，其中少数电子就可能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，形成带负电的载流子。自由电子的出现，使得在共价键的位置上留下了空位。这意味着原子已经失掉电子而带正电，这种由于原子共价键结构的破坏而造成的空位称为“空穴”。显然空穴与自由电子是成对出现的。在室温条件下，单晶的半导体中存在一定数量的电子—空穴对，如图 1-3 所示，这种现象称为热激发。

由于含空穴的原子带有正电，它将吸引相邻原子中的价电子，并使它挣脱原来共价键的束缚去填补前者的空穴，从而在自己的位置上出现新的空穴。当价电子按某一方向填补空穴时，带正电荷的空穴则按相反方向移动。从这个意义上看，空穴和自由电子一样，也是一种载流子。空穴带正电，一个空穴所带电量为一个电子的电荷量。正是有了自由电子和空穴这两种可以自由移动的载流子，半导体才具备了一定的导电能力。而通过对半导体内部载流子浓度的人为控制，可以使半导体具备独特的导电特性。

三、半导体的导电特性

1. 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。在本征半导体中，每形成一个自由电子，同时出现一个空穴，它们成对出现，这种现象称为本征激发，热激发属于本征激发。自由电子在运动过程中与空穴相遇时，如果它以一定的方式放出原来吸收的能量，就能填补这个空穴，一对自由电子—空穴就消失了，这种现象称为复合。在一定温度下，单位时间内激发的载流子数和复合的载流子数处于相对平衡状态，载流子保持一定的浓度。实验发现，温度升高时载流子浓度将按指数规律增加，因此半导体导电能力相应增强。

自由电子和空穴是半导体中的两种载流子。这些载流子都是“自由”的，可以在外电场的作用下反向运动。如果从本征半导体引出两个电极并接上电源，此时带负电的自由电子向电源正极定向运动，形成电子电流；带正电的空穴将向电源负极定向运动，形成空穴电流；外电路中的电流为电子电流和空穴电流之和。

2. 杂质半导体

在纯净的半导体中虽然有自由电子和空穴两种载流子，但在常温下数量都极少，因此导电性能极差。如果在纯净的半导体中掺入某些微量杂质，就可使半导体的导电性能显著增强。根据所掺杂质的不同，杂质半导体可分为两类。

(1) P 型半导体。图 1-4 是硅晶体中掺入硼原子后，由硼原子和硅原子组成的共价键结构示意图。由于硼原子数目比硅原子数目少得多，因此整个晶体的空间结构不变。硼是三价元素，最外层只有三个价电子，所以当它与硅原子组成共价键时，因缺少电子而会形成空穴。在室温下这些空穴能吸引邻近的价电子来补充，使硼原子变成带负电的离子。每插入一个硼原子都能提供一个空穴，从而使硅晶体中空穴的数目大大增加，而自由电子却很少，这种半导体的导电主要靠空穴，因此称为空穴半导体，又称为 P 型半导体。P 型半导体的空穴是多数载流子（以下简称多子），电子是少数载流子（以下简称少子）。

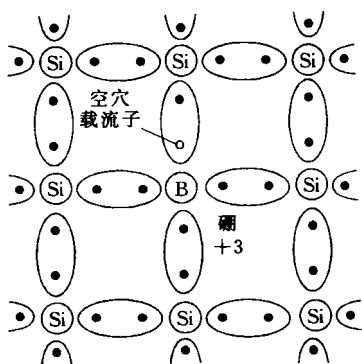


图 1-4 P 型半导体的结构

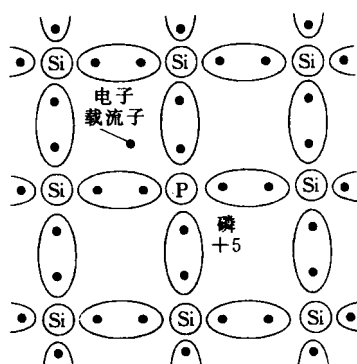


图 1-5 N 型半导体的结构

(2) N 型半导体。图 1-5 是硅晶体中掺入五价元素磷以后，硅原子和磷原子组成的共价键结构示意图。磷原子的五个价电子中，四个电子组成共价键，多出的一个电子很容易摆脱原子核的束缚成为自由电子，同时磷原子变成带正电的离子，而且自由电子数目很多。这种半导体导电主要靠自由电子，所以称为电子半导体，又称 N 型半导体。在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，而空穴则为少数载流子。

在杂质半导体中，多数载流子数量取决于掺杂浓度，少数载流子数量取决于温度。

四、PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

在同一块本征半导体基片中，采用特殊的掺杂工艺，使其一侧成为 N 型半导体，另一侧成为 P 型半导体。由于 P 型半导体中的空穴多于自由电子，而 N 型半导体中的自由电子多于空穴，这样自由电子和空穴都要从浓度高的区域向浓度低的区域扩散，即多子因浓度差而形成扩散运动。在两种半导体交界面附近，P 区的空穴扩散到 N 区，且与 N 区的自由电子相遇而复合，自由电子与空穴成对消失，在 P 区一侧留下不能移动的负离子空间电荷区。同理，N 区的自由电子扩散到 P 区后，与 P 区的空穴复合，在 N 区一侧留下不能移动的正离子空间电荷区，如图 1-6 所示。空间电荷区形成了一个方向由 N 区指向 P 区的内电场，内电场的作用是阻碍多子的扩散运动，故也称此空间电荷区为阻挡层。同

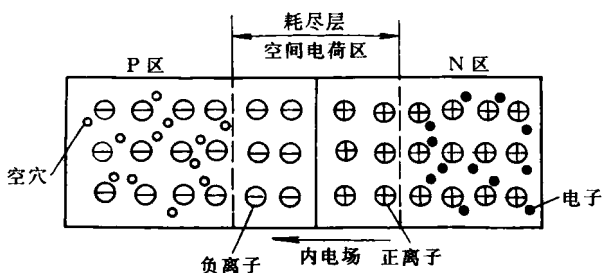


图 1-6 PN 结载流子的运动

时，内电场的存在却有助于 P 区的自由电子（少数）进入 N 区、N 区的空穴（少数）进入 P 区，这种少数载流子在内电场作用下的定向运动称为少子的漂移运动。少数载流子漂移运动的结果是使空间电荷区变窄，内电场削弱，这又将引起多数载流子扩散以增强内电场。在一定的温度下，两种运动达到动态平衡，空间电荷区相对稳定，形成了 PN 结。

可以想象，在平衡状态下，自由电子从 N 区到 P 区的扩散电流必然等于它从 P 区到 N 区的漂移电流。同样，空穴的扩散电流和漂移电流也必然相等。总的多数载流子扩散电流等于少数载流子漂移电流，且两者方向相反，PN 结中的电流为零。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

综上所述，在无外电场或其他因素激发时，PN 结处于动态平衡状态，没有电流通过，空间电荷区是恒定的。由于空间电荷区内没有载流子，所以又叫耗尽层，其宽度一般为数微米。

2. PN 结的单向导电性

(1) PN 结外加正向电压。PN 结外加正向电压——电源正极接 P 区，负极接 N 区，这种连接方式称为正向接法，如图 1-7 所示。正向接法时，外电场与内电场方向相反，因而削弱了内电场，使耗尽层宽度减小，N 区的自由电子和 P 区的空穴都能顺利地通过 PN 结，形成较大的扩散电流 I 。至于漂移电流，本来就是少数载流子运动形成的，而少数载流子数量又很少，对总电流的影响可忽略，所以正向接法使 PN 结转化为导通状态，此时电阻很小。

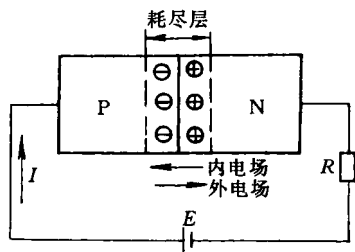


图 1-7 PN 结外加正向电压

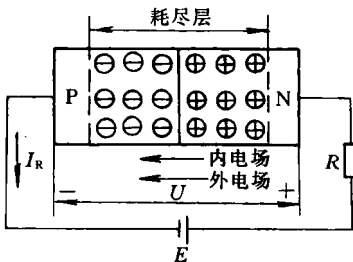


图 1-8 PN 结外加反向电压

(2) PN 结外加反向电压。PN 结外加反向电压——电源正极接 N 区，负极接 P 区，这种连接方式称为反向接法，如图 1-8 所示。反向接法时，外电场与内电场方向一致，耗尽层大大加宽，因此扩散难以进行，呈高阻抗状态，但有利于少数载流子漂移，在回路中产生了由少数载流子漂移所形成的反向电流 I_R 。因少数载流子浓度很低，数量有限，并在温度一定时浓度不变，所以反向电流不仅很小，且外加电压超过零点几伏后，基本不随外加电压的升高而增加，故称反向饱和电流。

总之，当 PN 结在外加正向电压时，呈现低电阻，流过较大的正向电流 I ，称 PN 结导通；外加反向电压时，呈现高电阻，流过很小的反向电流 I_R ，称 PN 结截止。所以 PN 结具有单向导电性。

第二节 半 导 体 二 极 管

一、基本结构

半导体二极管简称二极管，由 PN 结加上引出线和管壳构成，图 1-9 是几种常见类型二极管的结构示意图。

点接触型二极管的特点是 PN 结面积小，结电容小，因而高频性能好，常用于高频检波。面接触型二极管由于结面积大，因而结电容也大，只能在较低的频率下工作，常用做整流。结面积较大的硅平面二极管可以通过较大的电流，适用于大功率整流；结面积较小的硅平面二极管常用在脉冲电路中做开关管。二极管的电路符号如图 1-9 (d) 所示。

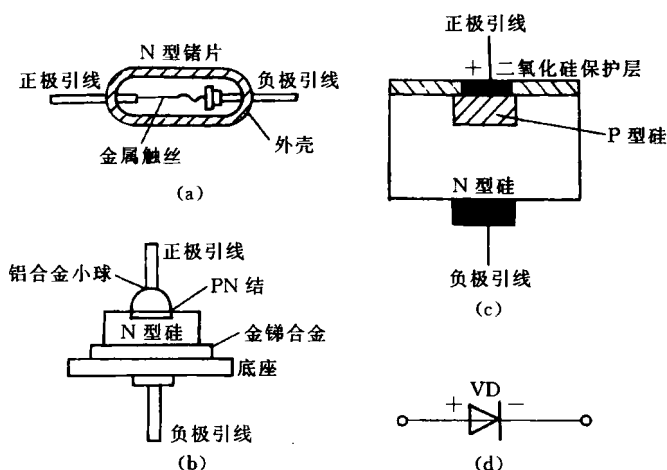


图 1-9 半导体二极管结构及符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 符号

二、伏安特性曲线

二极管伏安特性曲线是指二极管两端的电压 U 和流过管子的电流 I 之间的关系，用来描述二极管的导电性能。二极管的伏安特性曲线如图 1-10 所示，位于第一象限的是正向伏安特性曲线，位于第三象限的是反向伏安特性曲线。

1. 正向特性

从图 1-10 可见，在二极管正向特性起始部分，由于外加正向电压较小，外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子所造成的阻力，这时的正向电流几乎为零，二极管呈现很大的电阻。这个范围称为“死区”，相应的电压称为死区电压。锗管死区电压约为 0.1V，硅

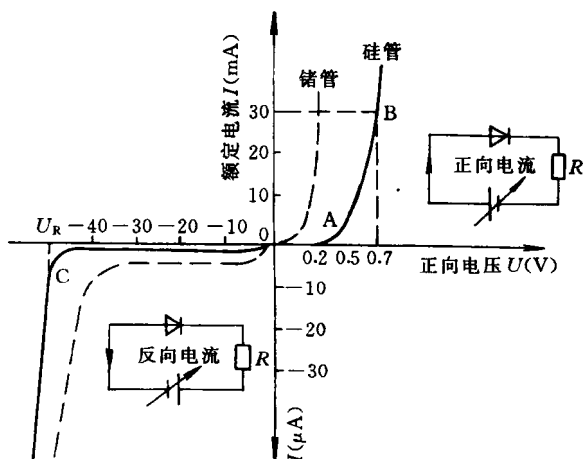


图 1-10 二极管伏安特性曲线

管死区电压约为 0.5V （特性曲线 0A 段）。当正向电压大于死区电压后，内电场被削弱，因而电流增加很快（特性曲线 AB 段）。一般在正常工作情况下，锗管的正向导通压降为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ ，硅管的正向导通压降为 $0.6\sim 0.7\text{V}$ 。

2. 反向特性

二极管的 PN 结在反向电压作用下，少数载流子很容易通过 PN 结形成反向电流。由于少子是有限的，因此在反向电压不超过某一范围时，反向电流的大小基本恒定（特性曲线 0C 段），故通常称为反向饱和电流。

3. 反向击穿区

当反向电压高到一定数值时，因外加电场过强，破坏共价键而把价电子拉出，引起载流子的数目剧增，反向电流就会突然增大，这种现象称为电击穿。发生击穿时的反向电压叫反向击穿电压 U_{R} 。如果二极管的反向电压接近或超过这个数值，而没有适当的限流措施，将会因电流过大，使管子过热而造成永久性的损坏。

三、主要参数

1. 最大整流电流 I_{FM}

二极管长期使用时允许通过的最大正向平均电流为最大整流电流，它由 PN 结的面积和散热条件决定。使用时应注意通过二极管的电流不能大于这个数值，否则二极管会因过热而损坏。

2. 最大反向工作电压 U_{RM}

最大反向工作电压是保证二极管不被击穿而给出的最高反向电压。一般手册上给出的最大反向工作电压约为击穿电压的一半，其目的是确保二极管安全工作。

3. 最大反向电流 I_{RM}

最大反向电流是最大反向电压下的反向电流。由于温度对反向电流影响很大，因此 I_{RM} 愈大，二极管单向导电性能愈差。

4. 最高工作频率 f_{M}

二极管具有一定的电容效应，在 PN 结内有不能移动的正负离子，具有一定的电荷量。当外加电压使耗尽层变宽时，电荷量增加，相当于电容充电；当外加电压使耗尽层变薄时，电荷量减少，相当于电容放电，这种电容效应称为结电容，其大小与 PN 结的结面积成正比，与耗尽层的宽度成反比。当外加电压改变时，耗尽层宽度改变，结电容大小也相应改变。

结电容的存在限制了二极管的工作频率，因加高频电压时，结电容将通过高频电流，破坏了 PN 结单向导电性，故不同型号的二极管都有最高工作频率 f_{M} 的限制。结电容大的工作频率低，结电容小的工作频率高。

二极管根据其外形、结构、材料、功率和用途分成各种类型，这些不同类型的管子都按国家标准来命名，其命名方法见附录 A。

四、二极管的应用

二极管的应用非常广泛，利用其单向导电性，可以实现开关、整流、限幅、钳位、检波等功能。

1. 开关

进行二极管电路分析时，经常将二极管理想化。理想二极管有正向导通和反向截止两

种状态：二极管阳极电位高于阴极电位时正向导通，导通压降为零，二极管等效为短路；阴极电位高于阳极电位时二极管反向截止，反向电流为零，二极管等效为断路。因此理想二极管的等效电路为电子开关。

【例 1-1】 在图 1-11 (a) 所示电路中，忽略二极管正向导通压降，求输出电压 U_{AO} 。

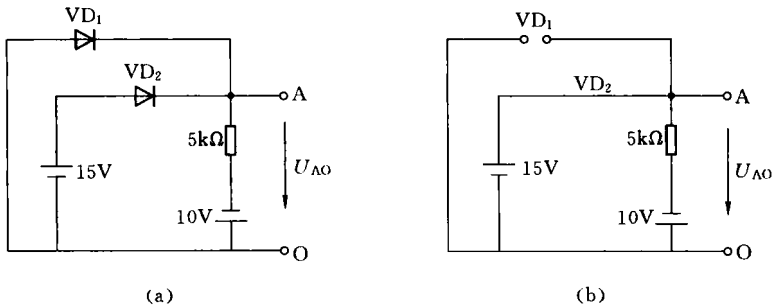


图 1-11 例 1-1 图

解：(1) 将两个二极管从电路中取出，以 O 点为零电位点，判断两个二极管两端的电位。

(2) 对于 VD_1 ： $U_{1+}=0V$ ， $U_{1-}=-10V$ ；对于 VD_2 ： $U_{2+}=15V$ ， $U_{2-}=-10V$ 。两个二极管共阴极连接时，阳极电位高的二极管先导通，故 VD_2 先导通。 VD_2 导通后， VD_1 阴极电位为 $U_{1-}=15V$ ，因此 VD_1 截止。

(3) 等效电路如图 1-11 (b) 所示，故 $U_{AO}=15V$ 。

2. 整流

整流是指将交流电转换为直流电，利用二极管的单向导电性可以实现整流。

【例 1-2】 在图 1-12 (a) 所示电路中， u_i 为正弦交流电压，忽略二极管导通压降，画出输出电压 u_o 的波形。

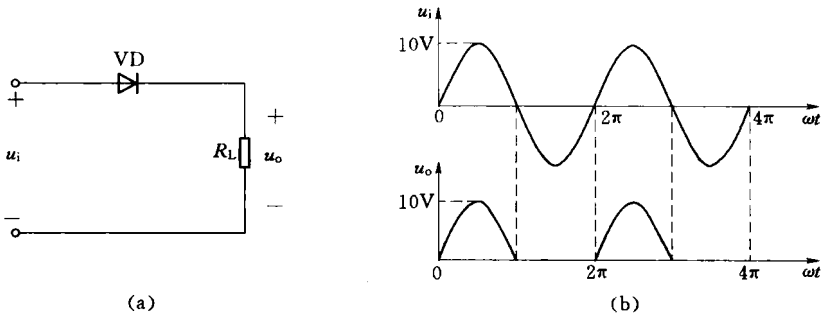


图 1-12 例 1-2 图

解：在 u_i 正半周，二极管 VD 正向导通， $u_o=u_i$ ；在 u_i 负半周，二极管 VD 反向截止， $u_o=0$ ，波形如图 1-12 (b) 所示。输出电压 u_o 的大小随时间变化，但方向保持不变，称为脉动直流电，二极管将交流电转换成为直流电。

3. 限幅

限幅是指限制输出信号的幅度，分为上限幅、下限幅和双向限幅。

【例 1-3】 图 1-13 (a) 所示电路中的 u_i 为正弦交流电压，其最大值为 10V，忽略二极管正向导通压降，画出输出电压 u_o 的波形。

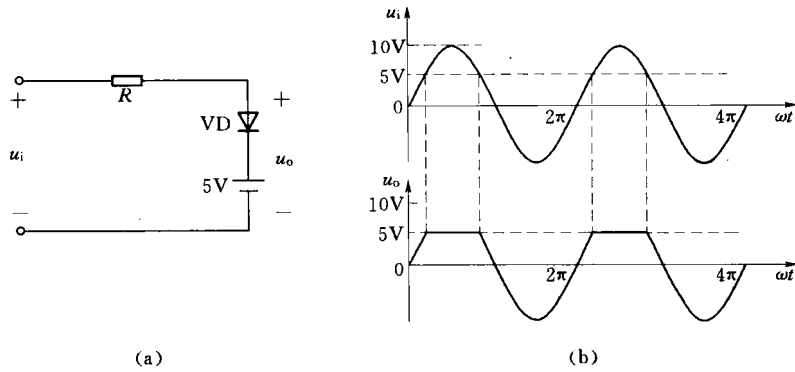


图 1-13 例 1-3 图

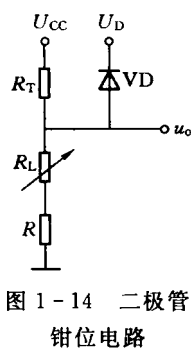


图 1-14 二极管
钳位电路

解：当 $u_i \leq 5V$ 时，VD 截止，二极管等效为断路， $u_o = u_i$ 。当 $u_i > 5V$ 时，VD 导通，二极管等效为短路， $u_o = 5V$ 。 u_o 的波形如图 1-13 (b) 所示。输入电压超过 5V 时，输出电压被限制在 5V 以下，其顶部被削去，二极管在这里起限幅或削波作用。

4. 钳位

钳位指将电路中某点电位钳制在某一数值上保持不变。图 1-14 为二极管钳位电路。设二极管为理想二极管，当 $U_{CC} > U_D$ 时，选择合适的 R_T ，使二极管工作在导通状态，此时，无论 R_L 如何改变，输出电压 u_o 始终等于 U_D ，实现了钳位功能。

第三节 特殊二极管

一、稳压二极管

1. 工作原理

稳压二极管是一种特殊的半导体二极管，它的符号和伏安特性曲线如图 1-15 (a) 和 (b) 所示。稳压二极管正常工作在特性曲线的反向击穿区。当稳压管的反向电压增高到击穿电压时，反向电流突然剧增，此后电流虽然在很大范围内变化，但稳压管两端电压基本保持不变。利用这一特性，配合限流电阻 R ，稳压二极管能在电路中起到稳定电压的作用，如图 1-15 (c) 所示。由于在制造工艺上采取了适当措施，只要保证反向电流不超过一定数值，PN 结的温度就不会超过允许值，管子就不会损坏。因此，稳压二极管的反向击穿具有可逆性，切断外加反向电压后，PN 结仍能恢复原状。

2. 主要参数

(1) 稳定电压 U_S (U_Z)。稳定电压是指稳压二极管在正常工作时管子两端的反向电压。手册中所列的都是在一定条件下（工作电流、温度）的数值，即使同一型号的管子，其稳压值也有一定的分散性。例如 2CW60 的稳定电压为 11.5~12.2V，是指对这种型号

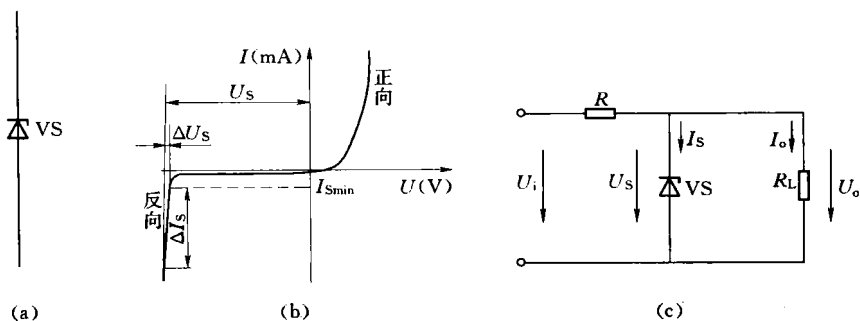


图 1-15 稳压二极管符号和特性曲线
(a) 符号；(b) 伏安特性曲线；(c) 稳压管稳压电路

的某个管子，它的稳定电压是在这个范围内的某一个确定数值。

(2) 稳定电流 I_S 。稳定电流是指稳压管正常工作时的参考电流值。电流低于此值时，稳压效果略差；高于此值时，只要不超过额定功率都可以正常工作。电流愈大，稳压效果愈好，但管子功耗要增加。工作时不能超过最大稳定电流 I_{SM} 。

(3) 动态电阻 r_s 。动态电阻是指稳压二极管在正常工作时，其电压的变化量与相应电流变化量之比，即： $r_s = \frac{\Delta U_S}{\Delta I_S}$ 。显然，反向伏安特性曲线愈陡， r_s 愈小，稳压性能也就愈好。稳压二极管的电阻随工作电流的增加而减小。因此，为了使稳压效果好一些，在允许的电流范围内，工作电流不宜选得太小。

(4) 耗散功率 P_S 。耗散功率是指稳压二极管不会因 PN 结温度过高而损坏的最大功率，它等于最大稳定电流 I_{SM} 与相应的稳定电压的乘积，即 $P_S = I_{SM} U_S$ 。

(5) 电压温度系数 α 。稳压管的稳定电压值随工作温度的不同而有所变化，通常用温度系数来表示稳压管的温度稳定性。例如 2CW7C 型稳压管的 $\alpha = 9 \times 10^{-4} ^\circ\text{C}$ ，相当于温度每升高 1°C 其稳压值将增加 0.09%。硅稳压管 U_S 低于 4V 时，具有负温度系数；高于 7V 时，具有正温度系数；在 4~7V 之间时，温度系数很小。

二、光电二极管

光电二极管又称为光敏二极管，管壳上有一个玻璃窗口能接收外部的光照。当没有外部光照时，管内载流子很少，通过二极管的反向电流很小，称为暗电流，其工作状态与普通二极管一样。当有光照射时，管内激发出大量的自由电子—空穴对，这些被激发的载流子通过外电路形成反向电流，称为光电流。光电二极管的 PN 结工作在反向偏置状态，其反向电流大小与入射光的强度和波长有关。图 1-16 是光电二极管的符号。

光电二极管可以用作光控元件，进行光的测量，还可用来制作光电池，不需外加电源而直接把光能变成电能。

三、发光二极管

发光二极管的原理与光电二极管相反，当通过正向电流时会发出光来，这是由于自由电子与空穴复合时放出能量的结果。发光二极管用砷化镓、磷化镓等制成，图 1-17 为发光二极管的符号。它的光谱范围比较窄，其波长由所使用的基本材料而定。发光二极管常用来作为显示器件，除了单个使用外，也常做成七段式数码显示管，工作电流一般在几毫

安至几十毫安之间。

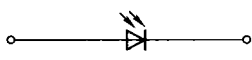


图 1-16 光电二极管符号

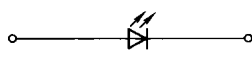


图 1-17 发光二极管符号

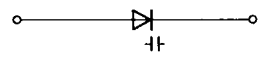


图 1-18 变容二极管符号

四、变容二极管

二极管具有电容效应，其结电容的大小除了与本身结构和工艺有关外，还与外加电压有关，结电容随反向电压的增加而减小，利用这种效应可以制造变容二极管，其符号如图 1-18 所示。变容二极管多采用硅或砷化镓等材料制成，由于其电容值较小，所以主要适用于高频电子电路。

第四节 半 导 体 三 极 管

半导体三极管（简称三极管）又称晶体管，是组成放大电路的核心器件。

一、基本结构

三极管有三个电极，通过一定的工艺，将两个 PN 结结合在一起，在三极管内部形成 P-N-P 或 N-P-N 三层结构。因此，从结构形式上来分，三极管有 PNP 型和 NPN 型两种，其结构示意图及图形符号如图 1-19 所示。三极管有三个不同的导电区域，中间的是基区，两侧分别是发射区和集电区。每个导电区上引出一个电极，基区引出的称为基极，用符号 B 表示；发射区引出的称为发射极，用符号 E 表示；集电区引出的称为集电极，用符号 C 表示。三层半导体在交界面形成了两个 PN 结，基区与发射区之间的 PN 结称为发射结，基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。

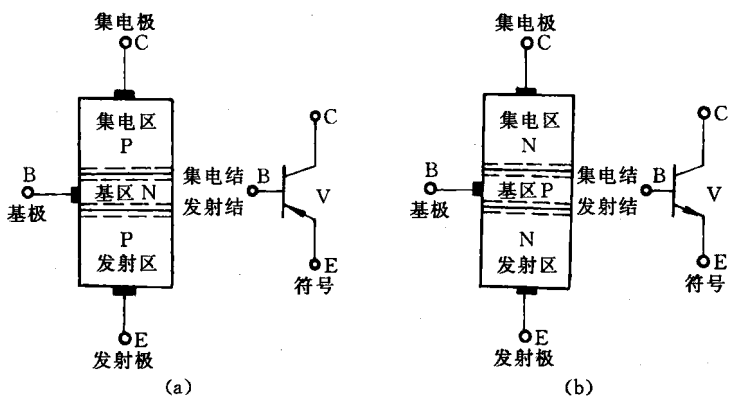


图 1-19 三极管结构示意图及图形符号
(a) PNP 型；(b) NPN 型

三极管三个导电区的杂质浓度有所不同，发射区浓度最高，基区浓度最低。以 NPN 型为例，发射区的自由电子浓度比基区空穴浓度高 100 倍以上。此外，集电区的几何尺寸比发射区要大，基区很薄，这些都是三极管具有放大作用的内部条件。

PNP 型和 NPN 型三极管符号的区别是发射极箭头指向不同，见图 1-19。发射极箭头方向表示发射结在正向接法时的电流真实方向。PNP 型和 NPN 型三极管的工作原理相

似，只是使用时电源连接极性不同。

二、电流放大作用

1. 三极管内部载流子的运动和分配过程

模拟电子电路中，三极管起电流放大作用。三极管电流放大作用的内部条件是其结构上的特点；外部条件是发射结要正向偏置，集电结要反向偏置。现以 NPN 型三极管为例简述如下（见图 1-20）。

三极管接成两个回路，基极回路和集电极回路。发射极是两个回路的公共端，这种接法称为三极管的共发射极接法。电源 E_B 的正极接基区（P 区），负极接发射区（N 区），使发射结加上正向电压（称为正偏）。电源 E_C 接在集电极与发射极之间， $E_C > E_B$ ，它使集电结得到反向电压（称为反偏）。

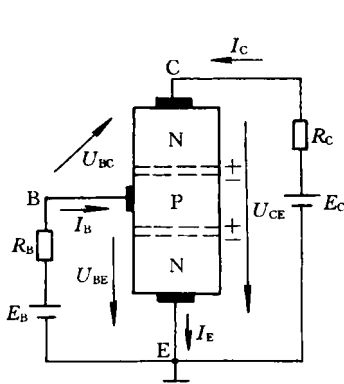


图 1-20 NPN 型三极管放大电路的电源接法

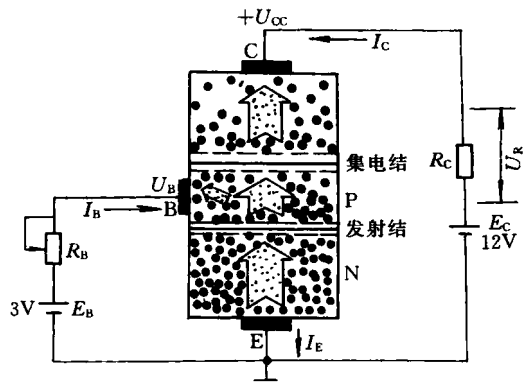


图 1-21 三极管内部载流子运动示意图

三极管内部多数载流子运动过程如图 1-21 所示。

(1) 发射区向基区发射电子形成发射极电流 I_E 。发射区的多数载流子——自由电子，在发射结正向电压作用下，源源不断地越过 PN 结进入基区，形成发射极电流 I_E 。此时，基区的多数载流子（空穴），在发射结正向电压作用下，也会扩散到发射区，但由于基区的杂质浓度低，这部分电流可略去不计，因此发射极电流主要是电子电流。

(2) 电子在基区扩散与复合形成基极电流 I_B 。电子到达基区后，使基区中靠近发射结的电子增多，靠近集电结的电子少，形成浓度上的差异而继续向集电结扩散。在扩散过程中有少量电子与基区的空穴复合，同时基极电源 E_B 给基区补充空穴，形成电流 I_B 。由于基区很薄，且掺杂浓度很低，所以 I_B 很小。

(3) 电子被集电极收集形成集电极电流 I_C 。绝大部分电子扩散到集电结的边缘，由于集电结是反向偏置，所以扩散到集电结边缘的电子在电场的作用下，很容易被集电极所收集，形成集电极电流 I_C 。

2. 电流分配关系

从以上分析可以看出： $I_E = I_B + I_C$ ，且 $I_C \gg I_B$ ， I_C 与 I_B 之比称为直流电流放大系数 β ，即

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$