

21世纪电学科高等学校教材

电子技术

杨 方 赵朝会 丁文彦 任振辉 主编



1-43
4



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21世纪电学科高等学校教材

电子技术

主 编 杨 方 赵朝会 丁文彦 任振辉
副主编 黄桂林 张锡志 房俊龙 高利军
刘 杰 陈春玲
参 编 赵峻颖



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是 21 世纪电学科高等学校教材之一。本书介绍了常用半导体器件、基本放大电路；集成运算放大器、直流电源、晶闸管电路、数字电路基础、触发器及时序逻辑电路等内容。

本书可作为高等学校非电专业的本、专科教材，也可供电气工程技术人员和电气技术爱好者参考和自学。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术/杨方等主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2002

21 世纪电学科高等学校教材

ISBN 7-5084-1051-3

I. 电… II. 杨… 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 (2002) 第 028753 号

书 作 出 版 、 发 行	名 者	21 世纪电学科高等学校教材 电子技术 杨方 赵朝会 丁文彦 任振辉 主编 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售		全国各地新华书店
排 印 规 版 印 定	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京密云红光印刷厂 787×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 326 千字 2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月北京第一次印刷 0001—6800 册 20.50 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《电子技术》一书是全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一。该书的基本内容符合全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《电子技术》教学大纲，可作为高等农业、林业、水利水电院校或其他院校非电专业的本、专科教材，也可供电气工程技术人员和电气技术爱好者参考与自学。

在本教材编写过程中，作者总结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内容，对一些问题的分析思路和解答方法做了修改，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。本教材参考学时为 50~70 学时。

参加本教材编写的单位有：东北农业大学、河南农业大学、沈阳农业大学、河北农业大学、南京农业大学、黑龙江“八一”农垦大学、内蒙古农业大学等七所院校。

本书编写人员：杨方、赵朝会、丁文彦、任振辉、黄桂林、张锡志、房俊龙、高利军、刘杰、陈春玲、赵峻颖。全书由东北农业大学欧阳斌林教授主审。

由于编者水平和时间所限，书中疏漏和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2002 年 4 月

1405/102

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	4
第三节 晶体三极管	9
第四节 场效应管	15
小结	22
习题	22
第二章 基本放大电路	24
第一节 低频电压放大电路	24
第二节 低频放大电路的分析方法	25
第三节 场效应管放大电路	38
第四节 多级放大电路	41
第五节 功率放大电路	50
小结	54
习题	54
第三章 集成运算放大器	60
第一节 集成运算放大器简介	60
第二节 具有负反馈的线性集成运算放大器	63
第三节 集成运算放大器的应用	77
第四节 使用集成运算放大器时应注意的几个问题	95
小结	96
习题	97
第四章 直流电源	104
第一节 整流电路	104
第二节 滤波电路	106
第三节 稳压电路	110
第四节 集成稳压电源	112
第五节 开关型稳压电路	115
小结	116
习题	117
第五章 晶闸管电路	119
第一节 常用电力电子器件	119

第二节 可控整流电路	123
第三节 晶闸管触发电路	129
第四节 晶闸管保护电路	133
第五节 逆变、变频与交流调压	134
第六节 晶闸管电路应用实例	146
小结	149
习题	150
第六章 数字电路基础	151
第一节 数字电路概述	151
第二节 基本门电路	153
第三节 CMOS 集成门电路	157
第四节 与非门电路	161
第五节 组合逻辑电路	163
第六节 编码器	171
第七节 译码器和数码显示	173
小结	176
习题	176
第七章 触发器及时序逻辑电路	178
第一节 双稳态触发器	178
第二节 寄存器	183
第三节 计数器	186
第四节 电平转换电路	189
第五节 555 定时器	192
第六节 D/A 转换和 A/D 转换的基本概念	197
小结	200
习题	201
附录 A 半导体器件型号命名方法	203
附录 B 型号组成部分的符号及其意义	204
附录 C 常用半导体器件参数	205
参考文献	208

第一章 常用半导体器件

第一节 半导体的基本知识

自然界中的物质，根据它们导电能力的强弱，分为导体、绝缘体和半导体三类。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，并且在不同条件下有很大的差别。

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，半导体可用作热敏元件。有些半导体的导电能力随光照（辐射能）而变化。光照愈强，导电能力愈大。利用这一特性，半导体可用作光敏元件。此外，在纯净的半导体中加入微量的杂质（指其他元素），它的导电能力会大大增强。利用这一特性，可制造出各种半导体器件，如二极管、三极管、场效应管及可控硅管等。

物质导电能力的大小与物质内部的原子结构和载流子的多少有关。物质内部载流子愈多，导电能力愈强。

一、半导体中的载流子

常用的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。

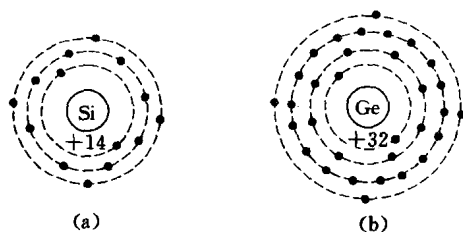


图 1-1 硅和锗原子结构示意图
(a) 硅原子结构；(b) 锗原子结构

图 1-2 为硅单晶原子排列示意图。硅原子的最外层有四个电子，从原子结构理论可知，外层要有八个电子才是稳定状态。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。

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”。显然此时空穴与自由

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。

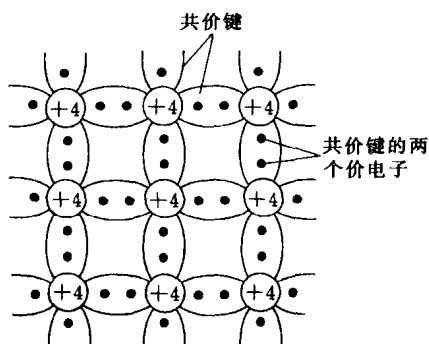


图 1-2 晶体的共价键结构

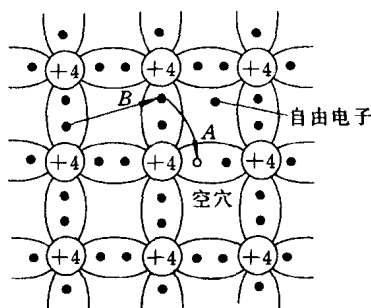


图 1-3 热运动产生的电子空穴对

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。这样，当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，空穴和电子一样，也是一种载流子。

二、半导体的导电特性

(一) 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。于是，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作定向运动，形成电子电流；带正电的空穴将向电源负极作定向运动，形成空穴电流，而在外电路中的电流为电子电流和空穴电流之和。

(二) 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。实验发现，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，由于所掺杂质的不同，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的多，因此整个晶体不变。硼是三价元素，外层只有三个电子，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，使杂质电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，简称P型半导体。P型半导体的空穴是多数载流子（以下可简称多子），电子是少数载流子（以下可简称少子）。

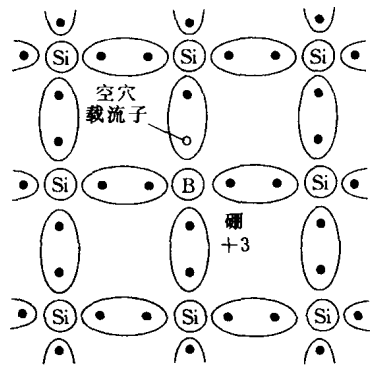


图 1-4 硅中掺硼形成空穴（P 型）

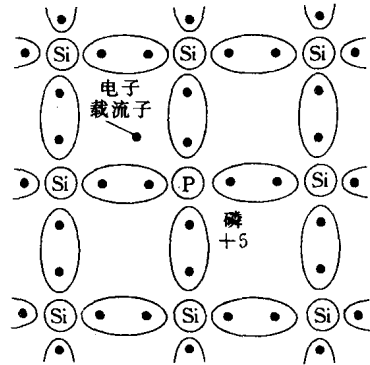


图 1-5 硅中掺磷出现自由电子（N 型）

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，同时杂质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电子，所以称为电子半导体，简称 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，多数载流子取决于掺杂，少数载流子取决于温度。

三、PN 结及其单向导电性

（一）PN 结的形成

在一块半导体中，通过掺杂这一特殊的工艺，使其一边成为 N 型半导体，另一边成为 P 型半导体。由于 P 型半导体中空穴多于电子，N 型半导体中电子多于空穴，这样电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。于是在两种半导体交界面附近，P 区的空穴扩散到 N 区，且与 N 区的电子复合，在 P 区一侧留下不能移动的负离子空间电荷区，同样 N 区的电子扩散到 P 区，且与 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，故也称此空间电荷区为阻挡层。但内电场却有助于少子的漂移运动，漂移是指在电场的作用下的少数载流子的定向运动。因此，N 区空穴向 P 区漂移，P 区的电子向 N 区漂移，其结果使空间电荷区变窄，内电场削弱，这又将引起多子扩散以增强内电场。可以想象，在平衡状态下，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。这时，空间电荷区相对稳定，形成了 PN 结。由于总的多子扩散电流等于少子漂移电流，且二者反向相反，PN 结中的电流为零。PN 结是构成各种半导体器件的

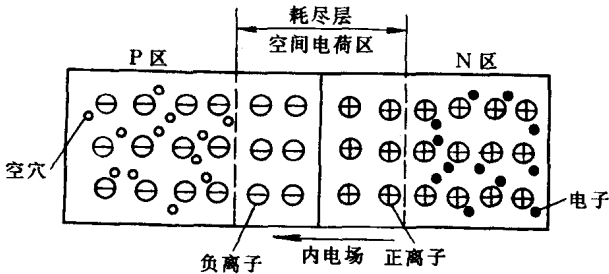


图 1-6 PN 结载流子的运动

基础。

综上所述, 在无外电场或其他因素激发时, PN 结处于平衡状态, 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。

(二) PN 结单向导电性

1. 外加正向电压

当 PN 结外加正向电压——电源正极接 P、负极接 N, 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, 这时电阻很小。

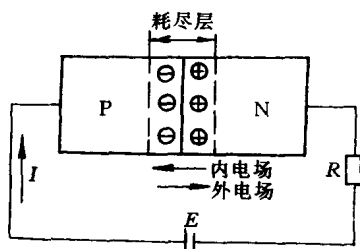


图 1-7 外加正向电压

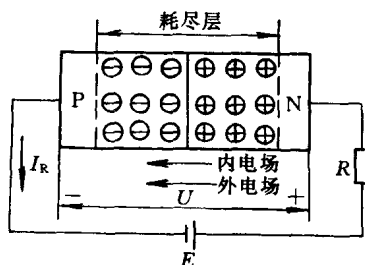


图 1-8 外加反向电压

2. 外加反向电压

PN 结加反向电压——电源正极接 N, 负极接 P, 这种连接方法称为反向接法, 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, 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, 由于少数载流子数量有限, 基本不随外加电压的增加而增加, 故称反向饱和电流。

总之, 当外加正向电压时, PN 结导通, 呈现低电阻, 流过较大的正向电流 I ; 外加反向电压时, PN 结呈现高电阻, 流过很小的反向电流 I_R , 可认为 PN 结是截止的, 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, 其结构是 PN 结加上引出线和管壳构成的, 图 1-9 是几种常见类型二极管结构示意图。

点接触型二极管 [图 1-9 (a)] 的特点是 PN 结面积小, 因而结电容小, 常用于高频, 检波。面接触型二极管 [图 1-9 (b)] 由于结面积大, 因而结电容也大, 只能在较低的频率下工作, 常用作整流。硅平面二极管 [图 1-9 (c)], 结面积较大时可以通过较大的电流, 适用于大功率整流; 结面积较小时, PN 结电容小, 常用于脉冲电路中作开关管。二极管的符号如图 1-9 (d) 所示。

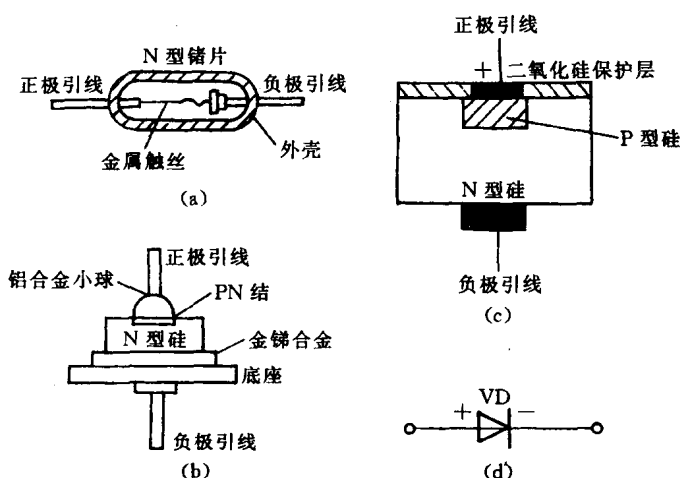


图 1-9 半导体二极管结构及符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 符号

二、二极管的伏安特性

二极管的性能常用伏安特性来表示，它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，二极管的伏安特性如图 1-10 所示，下面对二极管特性加以说明。

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（图 1-10 中 AB 段）。一般在正常工作情况下，锗管的正向导通压降约为 0.2~0.3V，硅管的正向导通压降约为 0.6~0.7V。

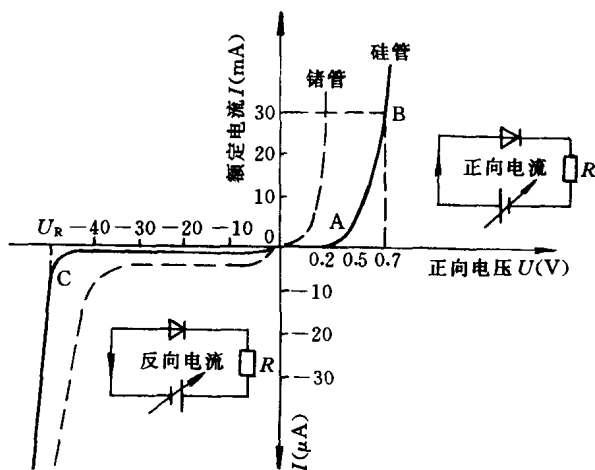


图 1-10 二极管伏安特性

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。由于少数载流子是有限的，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，故通常称之为反向饱和电流（图 1-10 中 OC 段）。

3. 反向击穿特性

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

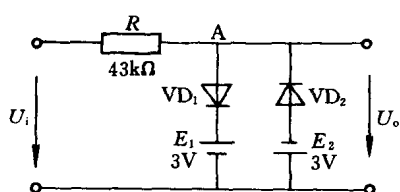


图 1-11 例 1-1 电路图

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。

【例 1-1】 在图 1-11 所示电路中,已知输入电压 $U_i = 5\sin\omega t$ (V),忽略二极管的导通压降(即认为导通时压降为零),求输出 U_o 。

解: 二极管承受正向电压时导通,承受反向电压时截止。当忽略二极管导通压降时,二极管的导通、截止情况可用开关的接通、断开来等效代替。下面分三种情况来讨论。

(1) $U_i > +3V$ 时,二极管 VD_1 承受正向电压而导通, $U_A = +3V$ 则二极管 VD_2 承受电压为

$$U_{VD2} = -E_2 + (-E_1) = -3 - 3 = -6 \text{ (V)}$$

故 VD_2 承受反压,处于截止状态。电路可等效为图 1-12 (a) 所示,由图可见

$$U_o = U_A = +3 \text{ V}$$

(2) $U_i < -3V$ 时,二极管 VD_2 承受正向电压而导通, $U_A = -3V$, 二极管 VD_1 承受

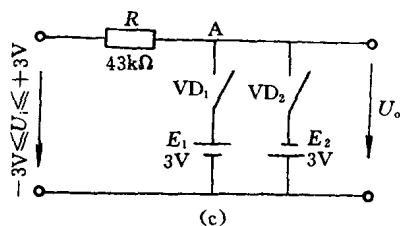
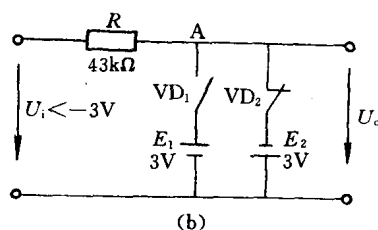
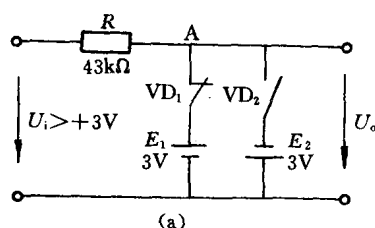


图 1-12 图 1-11 的等效电路

反向电压处于截止状态。电路可等效为图 1-12 (b) 所示,由图可见

$$U_o = U_A = -3 \text{ V}$$

(3) $-3V \leq U_i \leq +3V$ 时,二极管 VD_1 、 VD_2 均承受反向电压而截止。电路可等效为图 1-12 (c) 所示,由图可见

$$U_o = U_i$$

综上所述

$$U_o = \begin{cases} +3V & U_i > +3V \\ U_i & +3V \geq U_i \geq -3V \\ -3V & U_i < -3V \end{cases}$$

由此可绘出,图 1-11 所示电路的输入电压 U_i 和输出电压 U_o 的波形如图 1-13 所示。

此种电路是利用二极管的单向导电特性,将输出电压的幅值限制在 $\pm 3V$ 之间,这种电

路称为限幅电路或削波电路，它的应用很广泛。

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，各具有一定的电荷量。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、特殊二极管

(一) 稳压二极管

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1-14所示。与一般二极管不同之处是，它正常工作在PN结的反向击穿区，由于在制造工艺上采取了适当措施，使得接触面上各点的电流比较均匀，保证在一定的反向电流数值内，其结温不会超过允许值，因而不致损坏，它的反向击穿具有可逆性，切断外加电压后，PN结仍能恢复原状。

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，但稳压管两端电压却变化很小。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。

稳压二极管的主要参数如下：

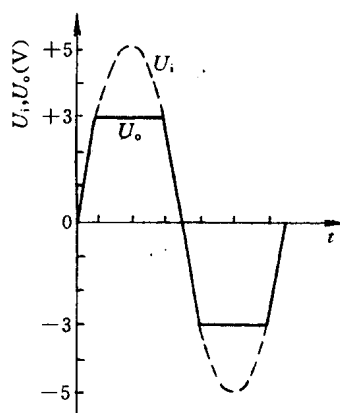


图 1-13 U_i 和 U_o 的波形图

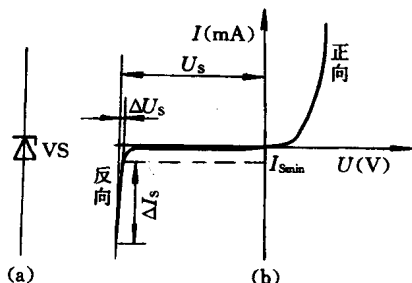


图 1-14 稳压二极管符号和特性曲线

(a) 符号；(b) 伏安特性曲线

1. 稳定电压 U_s

稳定电压是指稳压二极管在正常工作时管子两端的电压。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，是指对这种型号的某个管子，它的稳定电压是在这个范围内的一个确定数值。

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： $r_s = \Delta U_s / \Delta I_s$ 。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 α 为 $9 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ，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，而在 4~7V 之间，温度系数很小。

（二）硅稳压二极管的稳压电路

由硅稳压二极管组成的稳压电路如图 1-15 所示。VS 是稳压二极管， R 是限流电阻， R_L 是负载电阻。稳压电路的输入电压 U_i 就是整流滤波电路的输出电压，而稳压电路的输出电压 U_o 等于稳压二极管的稳定电压 U_s 。

稳压原理：当 R_L 不变，输入电压 U_i 升高引起输出电压 U_o 增大时，由稳压管的特性可知 U_o （即 U_s ）少量增加，将使 I_s 增加较大，于是引起 R 上的电压降增加，致使 U_i 的增加量大多降在 R 上，从而保持 U_o 基本不变。同理当 U_i 下降引起 U_o 减小时， I_s 变小， R 上的压降减小，保持 U_o 基本不变。

当电源电压保持不变而负载变化引起输出电压 U_o 改变，上述稳压电路仍能起稳压作用。当 I_o 增加即 R_L 减小时， U_o 减小，引起 I_s 减小，因 I_s 的减小补偿了 I_o 的增加，使通过 R 的电流以及 R 上的压降保持近似不变，所以 U_o 也近似不变。当 I_o 减小时，稳压过程相反。

用稳压二极管的稳压电路具有元件少、电路简单、调试方便等优点。缺点是输出电压是由稳压二极管的稳定电压决定的，故不能任意调节，负载电流变化靠稳压二极管的电流来调节，因此输出电流受二极管工作电流的限制而不能很大。稳压二极管稳压电路只适用于输出电流要求不大、稳压精度要求不高的场合。

(三) 光电二极管

光电二极管的特点是,当光线照射于PN结的时候,像热激发一样,产生电子空穴对,在半导体中增加了少子的浓度。这些空穴载流子在反向电压作用下可产生漂移电流,使反向电流增加,因此它的反向电流随光照的强度增加而增加,光电二极管的管壳上备有一个玻璃窗口,以便接受光照,图1-16是光电二极管的符号。

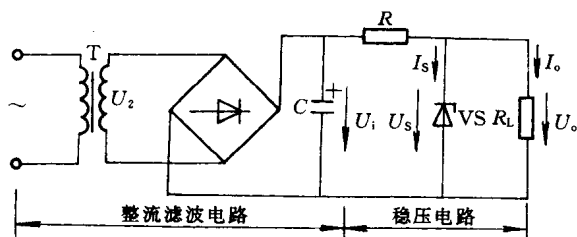


图 1-15 稳压二极管稳压电路

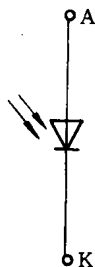


图 1-16 光电二极管符号

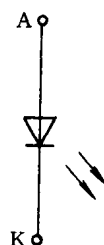


图 1-17 发光二极管符号

光电二极管可以用作光控元件,当制成大面积的光电二极管时,可当作一种能源而成为光电池,此时它不需外加电源,就能直接把光能变成电能。

(四) 发光二极管

发光二极管的原理与光电二极管相反,当这种管子正向偏置通过电流时会发出光来,这是由于电子与空穴直接复合时放出能量的结果。它的光谱范围是比较窄的,其波长由所使用的基本材料而定,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。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。

第三节 晶体三极管

晶体三极管简称晶体管,是组成放大电路的核心器件。

一、基本结构

晶体管是具有三个电极的半导体器件,其内部结构比二极管多一层P型半导体或N型半导体,形成P-N-P或N-P-N三层结构。因此,从结构形式上来分,就有PNP型和NPN型两种,其结构示意图及图形符号如图1-18(a)、(b)所示。每个晶体管都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PN结称发射结,基区与集电区之间的PN结称集电结。

晶体管的基区很薄。三个区的杂质浓度也有所不同,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大100倍以上,此外集电区的几何尺寸比发射区要大,这些都是晶体管能够起放大作用的内部条件。

PNP型和NPN型晶体管符号的区别是发射极的箭头指向不同,见图1-18(a)、(b)。

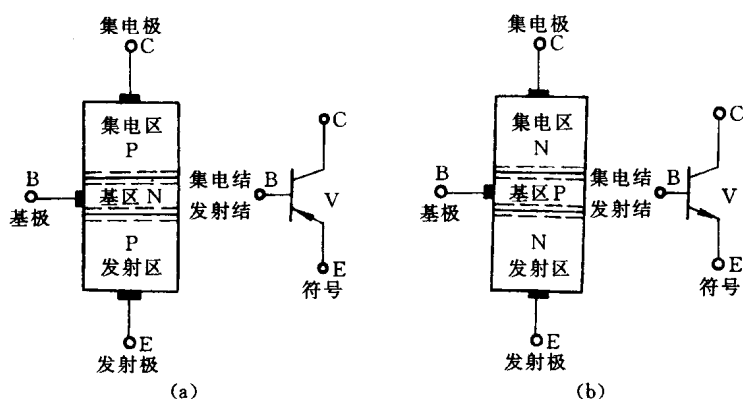


图 1-18 晶体三极管结构示意图及图形符号

(a) PNP 型; (b) NPN 型

发射极箭头,表示发射结在正向接法时的电流真实方向,PNP 型和 NPN 型晶体管的工作原理相似。只是使用时,电源连接极性不同。

二、晶体管的电流放大作用

晶体管内部结构上的特点是它具有放大作用的内部条件,而放大的外部条件是发射结要正向偏置,集电结要反向偏置,现以 NPN 型晶体管为例简述如下(见图 1-19)。晶体管接成两个回路,即基极回路和集电极回路。发射极是公共端,这种接法称为晶体管的共发射极接法。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)。

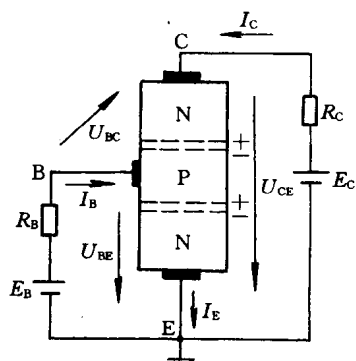


图 1-19 NPN 型晶体管放大电路
的电源接法

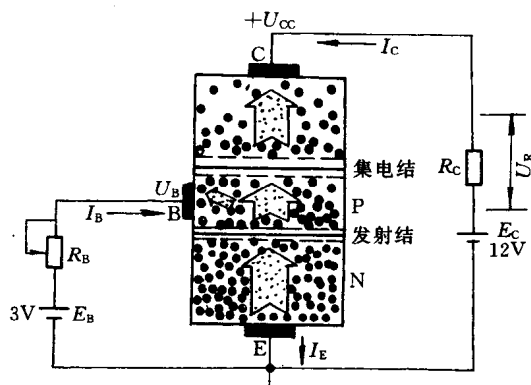


图 1-20 晶体管内部载流子运动
示意图

晶体管内部多数载流子运动的过程如图 1-20 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——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,由于基区的杂质浓度低,这部分所形成的电流可以略去不计,因此发射

极电流主要是电子流。

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,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,且空穴浓度很低,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 。

从以上分析可以看出: $I_E = I_B + I_C$, 且 $I_C \gg I_B$ 这就是晶体管的电流放大作用。把 I_C 与 I_B 之比称为直流电流放大系数 β , 即

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

当 I_B 有一增量 ΔI_B 时, I_C 也就相应地变化 ΔI_C , 且 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$, 集电极电流变化量与基极电流变化量之比称为交流电流放大系数 β , 即

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

综上所述: ①晶体管之所以能有电流放大作用,其内部条件是基区必须做得很薄,掺杂浓度又较低,而外部条件是集电结反偏,发射结正偏; ②电流放大作用的实质是用一个微小的 ΔI_B 去控制一个较大的 ΔI_C 。放大所需能量的来源是外加直流电源。

三、晶体管的特性曲线

晶体管的特性曲线表示基极电流 I_B 与基极—发射极间电压 U_{BE} , 以及集电极电流 I_C 与集电极—发射极间电压 U_{CE} 之间的关系。利用这些特性曲线可以较全面地、确切地了解晶体管的工作性能。特性曲线是晶体管内部微观现象的外部表现,从使用角度来说,了解表达晶体管外部性能的特性曲线比了解其内部物理过程更为重要,图 1-21 是测试晶体管特性曲线的电路,它分为输入回路和输出回路。

(一) 输入特性

输入特性是指当 U_{CE} 为某一固定值时,输入回路中基极电流 I_B 与 U_{BE} 间的关系,即

$$I_B = f(U_{BE}) | U_{CE} = \text{常数}$$

当 $U_{CE} = 0$ 时,相当于集电极与发射极之间短路。 I_B 与 U_{BE} 间的关系,就是发射结和集电结两个正向偏置二极管并联的伏安特性。

当 $U_{CE} \geq 1V$ 时,集电结已反向偏置,且内电场已足够大,可以把从发射区进入基区的电子绝大部分拉入集电区形成 I_C 。与 $U_{CE} = 0$ 时相比,即使在相同的 U_{BE} 下,流向基极的电流 I_B 减小,即特性曲线右移。

图 1-22 为晶体管 3DG4C 的输入特性曲线。严格地讲, U_{CE} 不同,所得的输入特性也略有不同。实际上,当 U_{CE} 超过一定数值(例如 1V)以后,只要 U_{BE} 不变,则注入基区电子数一定,而集电结所加的反向电压已能把注入基区的电子中绝大部分拉到集电极,以致 U_{CE} 再增加,而 I_B 也不再明显的减小,所以通常只需绘出 $U_{CE} = 1V$ 的一条输入特性曲线,就可以代表 $U_{CE} > 1V$ 的输入特性。