

高等学校适用教材

电子技术

孙国祉 主编

机械工业出版社

电 子 技 术

孙国祉 主编



机 械 工 业 出 版 社

EAP. 123 20

本书(修订版)是根据1987年国家教育委员会颁发的高等工业学校“电工技术”和“电子技术”两门课程的教学基本要求,结合农业工程类的专业特点修订编写的,全套书共分三册:《电工技术》、《电子技术》和《电工电子实验技术》。

本书主要内容有: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,门电路及组合逻辑电路,触发器及时序逻辑电路等。每章后有小结,同时配备一定数量的与教材密切结合的例题和习题。

本书参考学时为55~70学时,可作为高等农业院校农业工程类专业本科、专科以及职大、夜大的电子技术教材,也可供农业工程技术人员参考。

电子技术

责任编辑:蔡加辉,王中玉 版式设计:朱淑珍
封面设计:王晴 责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 $\frac{1}{16}$ ·印张 11 $\frac{3}{4}$ ·字数 284 千字
1991年8月北京第一版·1991年8月北京第一次印刷
印数 0,001—8,250·定价:5.90元

*

ISBN 7-111-02964-X/TM·382

前 言

本书是沈阳农业大学等六院校于1986年合编的《电工电子技术基础》修订版之一。根据国家教委关于工科非电专业电类课程设置的要求,修订版分《电工技术》、《电子技术》两册出版。修订的依据是国家教委1987年审定的《电工技术》、《电子技术》教学基本要求,吸取各院校使用原教材期间广大师生提出的意见和建议。每册参考教学学时为55~70学时。

修订版的主要特点如下:

1. 进一步突出了专业特点,兼顾农业工程类各专业的需要,扩大了适用范围。
2. 对部分内容做了更新和充实,并反映电工、电子技术的新发展和新动向。
3. 全书采用的图形、文字符号符合最新国家标准。
4. 有关的实践性教学内容和部分技术资料编入配套的《电工、电子实验技术》一书,将不在两本基本教材中反映。

参加本书修订、编写的单位是:沈阳农业大学、河北农业大学、山西农业大学、安徽农学院、河南农业大学、内蒙古农牧学院、浙江农业大学。

本书由孙国祉主编,郭章信、齐同春任副主编。

本书第一章由孙国祉和张青编写,第二章由齐同春编写,第三章由高栌编写,第四章由赵德新编写,第五章由史国栋、倪耀中编写,第六章由钟连声编写,第七章由郭章信编写。

本书初稿经全国农业院校电工学教学研究会1990年杭州会议审议。米玉芬副教授(东北农学院)、王光焱副教授(新疆石河子农学院)、冯爱珍副教授(广西农学院)、陈仁福副教授(西南农业大学)、国培光副教授(西北农业大学)、庞大衡副教授(山东农业大学)、杨国瑶副教授(贵州农学院)等对本书修订提出了许多宝贵意见,特此致谢。

由于我们水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有缺点和错误之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

1991年4月

目 录

第一章 常用半导体器件	1	二、分压式偏置电路	30
§ 1-1 半导体的基本知识	1	三、放大电路的输入电阻和输出电阻	31
一、半导体的导电特性	1	§ 2-4 共集电极放大电路——射极输出器	33
二、半导体中的载流子	1	一、射极输出器电路分析	33
三、P型和N型半导体	2	二、输入电阻和输出电阻	34
四、PN结及其单向导电性	3	§ 2-5 场效应管放大电路	36
§ 1-2 半导体二极管	4	一、共源极放大电路	36
一、基本结构	4	二、源极输出电路	39
二、二极管的伏安特性	5	§ 2-6 多级阻容耦合放大电路	39
三、主要参数	5	一、两级阻容耦合放大电路	39
四、二极管的分类和命名	6	二、电压放大倍数的计算	40
§ 1-3 特殊二极管	6	三、频率特性	42
一、稳压二极管	6	§ 2-7 功率放大电路	43
二、光电二极管	8	一、互补对称功率放大电路	44
三、发光二极管	8	二、复合管互补对称电路	45
§ 1-4 晶体三极管	8	小结	47
一、基本结构	8	习题	48
二、晶体管的电流放大作用	9	第三章 集成运算放大器	52
三、晶体管的特性曲线	10	§ 3-1 直接耦合放大电路和差动放大电路	52
四、晶体管的分类与命名	12	一、直接耦合放大电路的特点	52
五、主要参数	12	二、差动放大电路	55
六、温度对晶体管特性的影响	13	§ 3-2 集成运算放大器简介	61
§ 1-5 场效应管	14	一、集成运算放大器的组成、符号和电路模型	61
一、结型场效应管	14	二、集成运算放大器的主要参数	63
二、绝缘栅场效应管	16	三、集成运算放大器的电压传输特性	64
三、主要参数及使用时的注意事项	19	§ 3-3 放大电路中的反馈	64
小结	20	一、反馈的基本概念	64
习题	20	二、负反馈放大电路的类型	66
第二章 基本放大电路	22	三、负反馈对放大电路性能的改善	68
§ 2-1 基本放大电路的组成	22	§ 3-4 基本运算电路	71
一、组成原则	22	一、反相输入运算电路	72
二、静态工作点的设置与估算	23	二、同相输入运算电路	73
§ 2-2 放大电路的分析方法	24	三、差动输入运算电路	75
一、图解分析法	24	§ 3-5 集成运算放大器的应用	77
二、微变等效电路分析法	27		
§ 2-3 静态工作点的稳定	29		
一、温度对静态工作点的影响	29		

一、模拟信号的运算.....77	三、晶闸管交流开关与交流调压130
二、RC正弦波振荡电路.....83	§ 5-6 晶闸管电路应用实例.....13 ²
三、比较器.....86	一、自动稳流稳压电源132
四、方波发生器.....88	二、晶闸管直流调速系统133
五、集成运算放大器应用举例.....89	三、铅蓄电池晶闸管充电电源134
小结.....91	小结135
习题.....92	习题136
第四章 直流电源98	第六章 门电路及组合逻辑电路137
§ 4-1 整流电路98	§ 6-1 数字电路概述.....137
一、单相桥式整流电路.....98	一、数字电路与模拟电路概述137
二、三相桥式整流电路100	二、脉冲波形及参数137
§ 4-2 滤波电路.....102	三、二进制数138
一、电容滤波102	§ 6-2 基本门电路.....139
二、电感滤波105	一、“与”门电路139
三、复式滤波105	二、“或”门电路140
四、有源滤波106	三、“非”门电路141
§ 4-3 稳压电路.....107	§ 6-3 MOS集成门电路.....142
一、稳压管稳压电路107	一、CMOS“非”门电路142
二、串联型晶体管稳压电路109	二、CMOS“与非”门电路143
三、开关电源111	三、CMOS“或非”门电路143
四、集成稳压电源112	四、CMOS传输门144
小结113	五、三态门145
习题114	§ 6-4 TTL“与非”门电路.....146
第五章 晶闸管电路.....116	一、DTL“与非”门电路.....146
§ 5-1 晶闸管.....116	二、TTL“与非”门电路146
一、结构116	§ 6-5 组合逻辑电路.....146
二、工作原理116	一、布尔代数148
三、伏安特性117	二、组合逻辑电路的分析与综合151
四、主要参数118	三、组合逻辑电路设计举例152
§ 5-2 可控整流电路.....118	§ 6-6 编码器.....153
一、单相半控桥式整流电路118	一、编码器的概念153
二、三相半控桥式整流电路121	二、数的二—十进制编码 (BCD码).....153
§ 5-3 单结晶体管触发电路.....123	§ 6-7 译码器和数码显示.....154
一、单结晶体管123	一、辉光数码管和译码器155
二、弛张振荡电路125	二、荧光数码管和译码器155
三、触发电路125	小结157
§ 5-4 晶闸管保护电路.....127	习题157
一、过流保护127	第七章 触发器及时序逻辑电路159
二、过压保护127	§ 7-1 双稳态触发器.....159
§ 5-5 逆变、变频与交流调压.....128	一、R-S触发器159
一、无源逆变电路128	二、主从型J-K触发器161
二、有源逆变电路129	三、D触发器163

四、触发器逻辑功能的转换	163	六、CMOS与NMOS电路的接口	171
§ 7-2 寄存器	163	七、光电耦合电路与CMOS电路的 接口	171
一、并行输入并行输出寄存器	164	§ 7-5 555定时器	171
二、串行输入串行输出寄存器	164	一、单稳态触发器	171
§ 7-3 计数器	165	二、无稳态触发器 (多谐振荡器)	173
一、二进制加法计数器	165	三、施密特触发器	174
二、二一十进制加法计数器	167	§ 7-6 D/A转换和A/D转换的基本 概念	175
§ 7-4 电平转换电路	168	一、D/A转换	175
一、CMOS电路与晶体三极管的 接口	168	二、A/D转换	177
二、CMOS电路与集成运算放大器的 接口	169	小结	179
三、CMOS与TTL电路的接口	169	习题	179
四、CMOS与HTL电路的接口	169	参考文献	181
五、CMOS与PMOS电路的接口	170		

第一章 常用半导体器件

§ 1-1 半导体的基本知识

一、半导体的导电特性

自然界中的物质，根据它们导电能力的强弱，分为导体（例如银、铜、铝等金属）、绝缘体（例如塑料、橡胶等）和半导体（例如硅、锗等）三类，导体的导电能力很强，绝缘体的导电能力很弱，而半导体的导电能力则介于导体和绝缘体之间。

半导体除了导电能力与导体、绝缘体有所不同之外，还具有一些有用的特性：

1. 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。

2. 导电能力受光照（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。

3. 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。

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。

二、半导体中的载流子

物质都是由原子构成的，而原子又是由带正电的原子核和带负电的电子所组成。电子分几层围绕原子核作不停的运转。其中内层电子受原子核的束缚力较大，而外层电子受束缚力较小。

半导体材料的原子结构外层电子既不像导体那样容易挣脱，也不像绝缘体那样束缚得很紧，这就决定了它的导电能力介于导体与绝缘体之间。

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。一般的说，多晶体不能制作半导体器件。如果把多晶体再用一种半导体工艺“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。硅原子的最外层有四个电子，从原子结构理论可以知

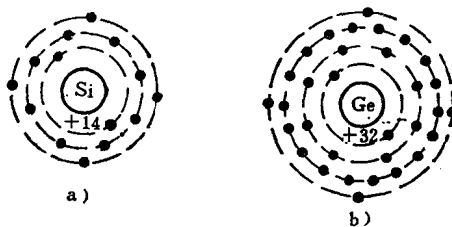


图1-1 硅和锗的原子结构示意图

a) 硅原子结构 b) 锗原子结构

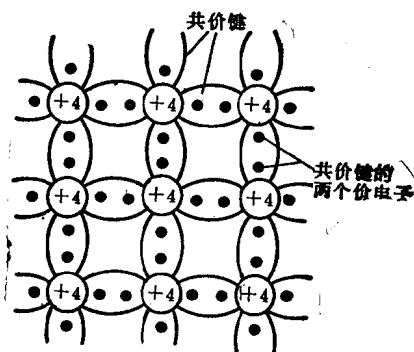


图1-2 晶体的共价键结构

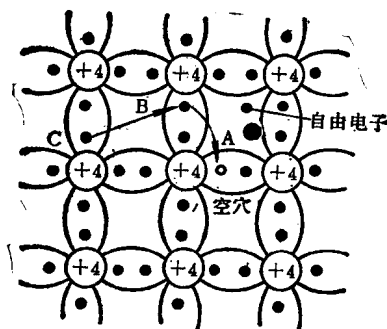


图1-3 热运动产生的电子空穴对

道，外层要有八个电子才是稳定状态。因此硅原子组成晶体时，每个原子都要争夺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。

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，当电子按某一方填补空穴时，就像带正电荷的空穴按相反方向移动。从这个意义上看，空穴和电子一样，也是一种载流子。

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。实验指出，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。

综上所述：半导体有两种载流子：自由电子和空穴，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指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。

三、P型和N型半导体

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，因此导电性能很差。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，由于所掺杂质的不同，掺杂半导体可分为两类。

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，使杂质原子变成带负电的粒子，每掺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，电子是少数载流子。

2. N型半导体

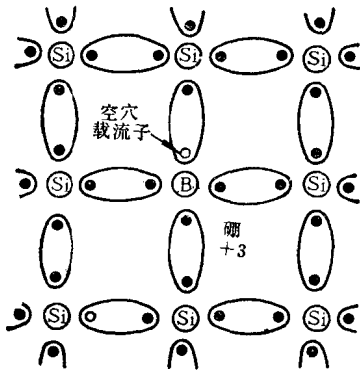


图1-4 硅中掺硼形成空穴 (P型)

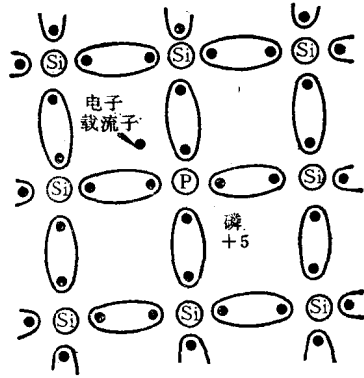


图1-5 硅中掺磷出现自由电子 (N型)

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粒子，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。

四、PN结及其单向导电性

1. 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，内电场消弱，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。

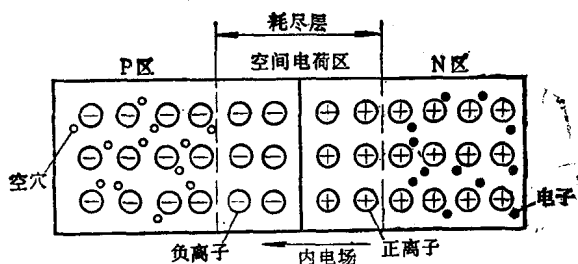


图1-6 PN结载流子的运动

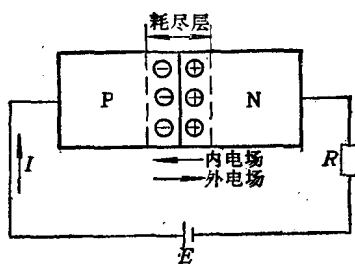


图1-7 外加正向电压

综上所述, 在无外电场或其它因素激发时, 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。

2. 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。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, 故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, 导电时电阻很小。

(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, 但有利于少子漂移, 在回路中产生了由少子漂移所形成的反向电流 I_R , 因少子浓度很低, 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。

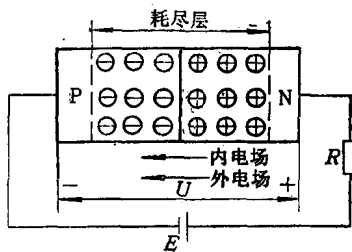


图1-8 外加反向电压

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, 外加反向电压时, PN结呈现高电阻, 流过很小的反向电流, 可认为PN结是截止的, 所以PN结具有单向导电性。

§1-2 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1-9a)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1-9b)由于结面积大, 允许通过的正向电流大, 常用作整流, 但这种

结构的结电容大,只能在较低的频率下工作。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,结面积小时,PN结电容小,常用在脉冲电路中作开关管。二极管的符号如图1-9 d所示。

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,因此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。锗管死区电压为0.1 V,硅管死区电压约为0.5 V(特性曲线0A段)。当正向电压大过死区电压后,内电场被削弱,因而电流增加很快(图中AB段)。一般在正常工作情况下,锗管的正向导通压降约为0.2~0.3 V,硅管的正向导通压降约为0.6 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(曲线0C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}

管子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

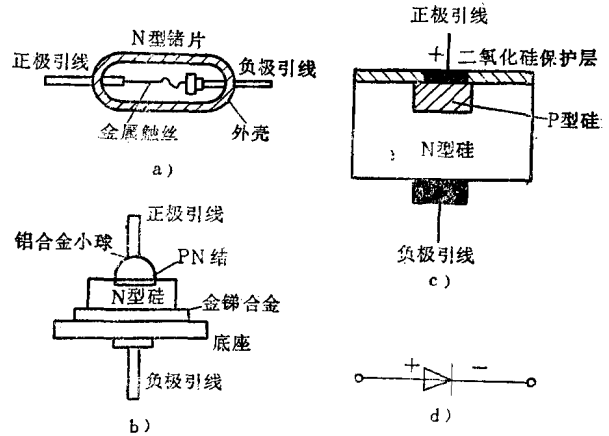


图1-9 半导体二极管结构及符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型 d) 符号

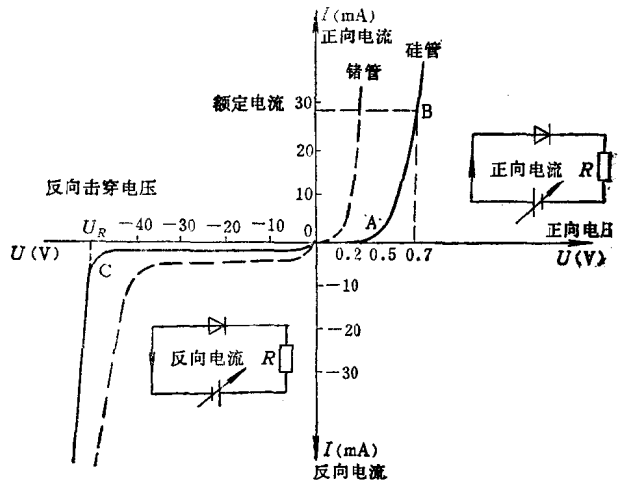


图1-10 二极管伏安特性

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，其目的是确保管子安全工作。

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。 I_{RM} 愈大二极管单向导电性能愈差，温度对反向电流影响很大，使用时应加以注意。

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。

四、二极管的分类和命名

二极管根据其外型、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，它由四部分组成，其命名方法如表1-1。

表1-1 二极管型号名称

第一部分（数字）		第二部分（汉语拼音字母）		第三部分（汉语拼音字母）		第四部分（数字）
电极数		材料和特性		二极管类型		同类管子序号
符号	含义	符号	含义	符号	含义	
2	二极管	A	N型锗	P	普通管	表示同类型管中某些性能参数上有差别
		B	P型锗	Z	整流管	
		C	N型硅	K	开关管	
		D	P型硅	W	稳压管	

§ 1-3 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1-11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，而不致损坏。原因是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，虽然工作在击穿状态，但其结温不会超过允许值，它的反向击穿是可逆的，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，稳压二极管能在电路中起到稳定电压的作用。

1. 稳压二极管的主要参数

(1) 稳定电压 U_s

稳定电压是指稳压二极管在正常工作下管子的两端电压。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2CW-5的稳定电压为11.5~14V，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。

(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 $P_s = I_s U_s$ 。

(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2CW17型稳压管的 α 为 $9 \times 10^{-4} ^\circ\text{C}^{-1}$ ，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。

几种常用稳压管的主要参数见《电工电子实验技术》一书。

2. 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1-12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 。

(1) 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。

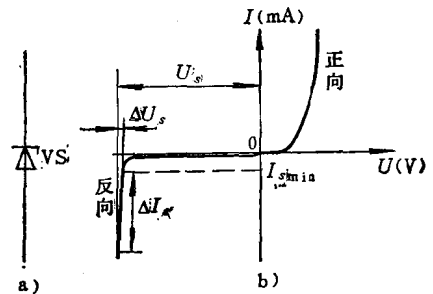


图1-11 稳压二极管符号和特性曲线

a) 符号 b) 伏安特性曲线

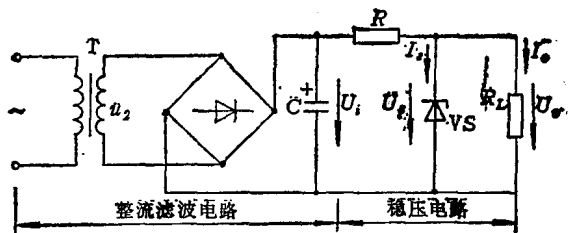


图1-12 稳压二极管稳压电路

当 I_L 增加即 R_L 减小时, U_L 减小, 引起 I_S 减小, 因 I_S 的减小补偿了 I_L 的增加, 使通过 R 的电流以及其 R 上的压降保持近似不变, 所以 U_L 也近似不变。当 I_L 减小时稳压过程相反。

稳压二极管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, 因此输出电流受管子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。

二、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。这些载流子在反向偏压下可以产生漂移电流, 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1-13是光电二极管的符号。



图1-13 光电二极管



图1-14 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, 可当作一种能源而称为光电池, 此时它不需外加电源, 就能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1-14所示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, 也常作成七段式, 工作电流一般在几毫安至几十毫安之间。

§ 1-4 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1-15 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

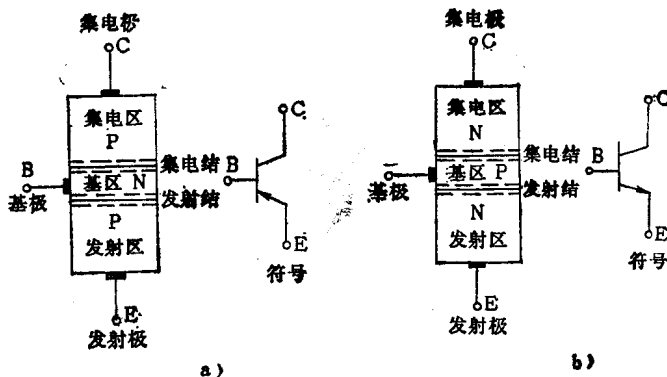


图1-15 晶体三极管结构示意图及图形符号

电区上引出一个电极，基区引出的称基极，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重要因素。

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1-15 a和b，发射极箭头，表示发射结在正向接法时的电流真实方向，PNP和NPN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1-16。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）。

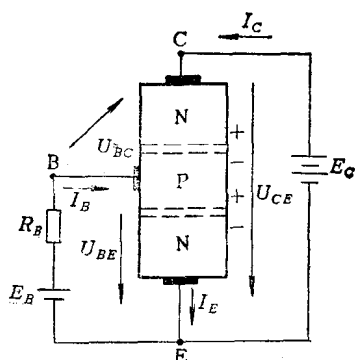


图1-16 NPN晶体管放大电路的电源接法

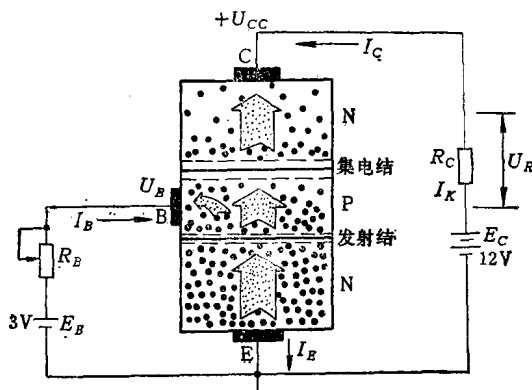


图1-17 晶体管内部载流子运动示意图

1. 晶体管内部多数载流子运动的过程

(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 $\bar{\beta}$

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

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1-18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。

1. 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

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

1) 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。

2) 当 $U_{CE} \geq 1\text{V}$ 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1-19所示是晶体管 3DG4C 的输入特性曲线。严格的讲, 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 $U_{CE} = 1\text{V}$ 的一条输入特性曲线, 就可以代表 $U_{CE} > 1\text{V}$ 的输入特性。

2. 输出特性

输出特性是指当 I_B 是某一固定值时, 输出电路中集电极电流 I_C 与集—射极之间电压 U_{CE} 的关系。

$$I_C = f(U_{CE}) |_{I_B=\text{常数}}$$

图1-20是输出特性曲线, 它可以划分为以下三个区域, 对应于三极管三种工作状态。

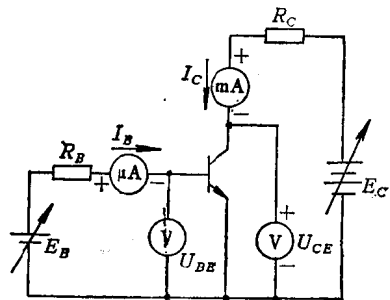


图1-18 晶体管特性实验图