



高等学校
适用教材

电子技术

DIANZI JISHU

魏之馨 主编

机械工业出版社

新 旧 符 号 对 照 表

名 称	新 符 号	旧 符 号	名 称	新 符 号	旧 符 号
理想电压源			异 或 门		
理想电流源			三 态 门		
受控电压源			数/模转换器		
受控电流源			模/数转换器		
二 极 管			触 发 器 (正 电 位 触 发)		
稳 压 管			触 发 器 (负 电 位 触 发)		
晶 闸 管			触 发 器 (正边沿触发及主从型)		
N 沟道耗尽型场效应管			触 发 器 (负边沿触发及主从型)		
N 沟道增强型场效应管			直 流 发 电 机		
P 沟道耗尽型场效应管			交 流 发 电 机		
P 沟道增强型场效应管			直 流 电 动 机		
理 想 运 算 器			交 流 电 动 机		
与 门			直 流 伺 服 电 机		
或 门			直 流 调 速 机		
非 门			三 相 鼠 笼 式 异 步 电 动 机		
与 非 门					
或 非 门					

前 言

《电子技术》教材是在机械电子工业部部属高等院校“电工技术、电子技术”课程协作组的组织与领导下编写的,并得到机电部教育司的支持与关怀。自1979年以来,在机电部(原一机部、机械委)高等院校电工学课程协作组每年举行一次的学术年会上,都把教材建设放在很重要的地位。编写本书的指导思想、教材内容的取舍以及完整体系的建立都是由协作组各院校有关教师经过多次研讨与反复审核后确定的。学术年会上邀请了一些部外高等院校的同行教师参加。因此,本书实际上是在协作组的主持下,机电部部属30余所高等院校及部外许多高等院校“电子技术”教师多年教学经验的集体成果。

《电子技术》是一门重要的技术基础课。本书是按55~70岁时类型编写的,其读者对象为非电类专业的大学生,亦可供工程技术人员学习使用。

本着“精选内容、打好基础、加强实验、培养能力”的精神,我们把教材的中心放在基本理论、方法、概念和电子器件的外特性及其使用知识等方面,并适当提高了起点,避免了与物理学中的有关内容不必要的重复。为了兼顾不同专业的需要,尽量接近工程实际,并反映科技发展的新形势,书中内容覆盖了国家教委委托“电工学”课程教学指导小组主持制定的“电子技术”的基本要求,还增添了一些选修内容(在书中以*号表示),教学时可根据需要选用。本书的电路图形符号和文字代号全部采用新的国家标准。

本书共七章,讲授与实验的比例约为5:2。第一章由江苏工学院谈大柏编写,第二章由湖南大学魏之馨编写,第三、四章由湖南大学吴振富编写,第五、六章由江苏工学院陈正传编写,第七章的§7-1至§7-3由洛阳工学院常通义编写,§7-4和§7-5由洛阳工学院周保定编写,全书由魏之馨主编,沈阳工业大学范振铨担任主审。第一、二章由安徽工学院罗会昌审阅,第三、四章由太原重型机械学院张旋玲审阅,第五、六章由陕西机械学院李炳彦审阅,第七章由吉林大学肖元凯审阅。李炳彦还组编了新旧电气图形符号与文字代号的对照图表。主审和审稿同志认真审阅书稿并提出许多宝贵意见和建议。湖南大学杨慧庄为本书描绘了全部插图,编者在此一并致以诚挚的谢意。

由于我们水平有限,不妥和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1989年11月

目 录

前 言

新旧符号对照表

第一章 基本放大电路 1

§ 1-1 PN结及其单向导电性 1

一、半导体知识简介 1

二、PN 结 2

§ 1-2 半导体二极管 3

一、二极管的特性 3

二、二极管的主要参数 4

§ 1-3 特殊二极管 5

一、稳压二极管 5

二、光电二极管 7

三、发光二极管 7

§ 1-4 半导体三极管 8

一、晶体管的电流放大作用 8

二、晶体管的特性曲线 9

三、主要参数 11

四、温度对晶体管特性和参数的影响 12

§ 1-5 基本放大电路 12

一、放大器的一般概念 12

二、放大器的组成 13

三、静态工作情况分析 14

四、动态工作情况分析 15

五、静态工作点与输出波形失真的关系 16

六、放大器的图解分析法 17

七、静态工作点的稳定 18

§ 1-6 微变等效电路分析法 19

一、晶体管的微变等效电路 19

二、放大器的微变等效电路 21

三、放大器的性能分析 21

§ 1-7 多级放大器及频率特性 23

一、阻容耦合放大器 23

二、放大器的频率特性 25

三、直接耦合放大器 28

§ 1-8 共集电极电路（射极输出器） 29

一、静态工作点的计算 29

二、动态性能分析 29

§ 1-9 互补对称功率放大电路 30

一、功率放大器的一般概念 30

二、互补对称功率放大电路 31

三、功率放大器应用举例 33

四、集成功率放大器 33

• § 1-10 场效应管放大电路 34

一、绝缘栅场效应管 34

二、场效应管放大电路 38

小 结 39

习 题 39

第二章 集成运算放大器 45

§ 2-1 差动放大电路 45

一、基本电路 45

二、工作原理 45

三、单端输入方式 49

四、应用实例 49

§ 2-2 集成运算放大器的基本概念 51

一、运算放大器的组成 51

二、集成运放的特点 51

三、集成运放的符号、外引线及参数 52

§ 2-3 基本运算电路 54

一、运放的模型和理想参数 54

二、反相输入运算电路 55

三、同相输入运算电路 56

四、差动输入运算电路 57

五、积分运算电路 58

六、微分运算电路 59

§ 2-4 运算放大器中的负反馈		二、集成触发电路	112
一、反馈的概念	61	§ 4-4 晶闸管的保护	113
二、负反馈的类型	62	一、过电流保护	113
三、负反馈对放大器性能的改善	65	二、过电压保护	114
§ 2-5 集成运放的应用	68	§ 4-5 逆变、变频和交流调压	114
一、比较器	68	一、无源逆变电路	114
二、正弦波振荡器	70	二、有源逆变和变频电路	115
三、电桥放大器	72	三、晶闸管交流开关与交流调压	117
四、精密整流电路	74	§ 4-6 晶闸管电路应用举例	119
五、应用实例	76	一、晶体管延时继电器	119
小 结	77	二、灯光自动调节器	119
习 题	77	小 结	119
第三章 直流电源	82	习 题	120
§ 3-1 概 述	82	第五章 门电路及组合逻辑电路	122
§ 3-2 整流电路	82	§ 5-1 数字电路概述	122
一、单相桥式整流电路	83	一、数字电路和模拟电路	122
二、三相桥式整流电路	84	二、二进制数	122
§ 3-3 滤波电路	87	三、脉冲信号	123
一、电容滤波	87	四、数字电路的应用	124
二、电感滤波	88	§ 5-2 基本逻辑门电路	124
三、复式滤波	88	一、与门电路	125
§ 3-4 串联型稳压电路	90	二、或门电路	126
§ 3-5 集成稳压电路	91	三、非门电路	127
一、集成稳压电路的主要参数	92	四、与非门、或非门	127
二、W7800系列三端固定式集成稳压电 路	93	§ 5-3 TTL与非门	128
三、开关型集成稳压电路	93	一、工作原理	129
四、集成稳压电路应用举例	95	二、几个主要参数	129
小 结	98	§ 5-4 逻辑门电路的组合	130
习 题	98	一、已知逻辑图, 写出逻辑式	130
* 第四章 晶闸管电路	101	二、已知逻辑要求, 画出逻辑图	132
§ 4-1 晶闸管	101	§ 5-5 译码器和数码显示	134
一、晶闸管的结构	101	一、半导体数码管	135
二、晶闸管的工作原理	101	二、半导体数码管译码显示电路	136
三、晶闸管的主要参数	102	§ 5-6 编码器	137
§ 4-2 可控整流电路	103	* § 5-7 MOS集成门电路	139
一、单相桥式半控整流电路	103	一、非门	139
二、三相桥式半控整流电路	106	二、与非门、或非门	139
§ 4-3 晶闸管的触发电路	109	三、传输门	140
一、单结晶体管触发电路	109	四、三态门	141

• §5-8 MOS组合逻辑电路举例	142
一、八通道数据选择器5G14512	142
二、MOS只读存储器	144
小 结	146
习 题	146
第六章 触发器及时序逻辑电路	150
§6-1 双稳态触发器	150
一、RS触发器	150
二、JK触发器	153
三、D触发器	155
§6-2 寄存器	156
一、数码寄存器	156
二、移位寄存器	156
§6-3 计数器	158
一、二进制加法计数器	158
二、十进制加法计数器	160
三、任意进制计数器	161
§6-4 电平转换电路	163
一、晶体管接口电路	163
二、集成接口电路	164
三、光电耦合器接口电路	165
§6-5 555定时器	166
一、单稳态触发器	166
二、无稳态触发器	168
三、施密特触发器	169
§6-6 模拟量和数字量的转换	170
一、数模转换器	170
二、模数转换器	172
§6-7 数字电路应用举例	173
小 结	176
习 题	177
• 第七章 自动控制系统	183
§7-1 概 述	183
§7-2 传感器	185

一、接点开关型传感器	185
二、电动势型传感器	186
三、电阻型传感器	187
§7-3 闭环控制系统	187
一、调速的概念	187
二、转速负反馈系统(有静差调速系统)	188
三、无静差调速系统	189
四、随动系统	190
§7-4 闭环控制系统的传递函数和方框图	190
一、元件的传递函数	191
二、控制系统的方框图及其变换	194
三、直流电动机调速系统的方框图和传递函数	196
四、电阻炉炉温控制系统的方框图和传递函数	196
五、位置随动系统的方框图和传递函数	198
§7-5 闭环控制系统的性能指标	198
一、过渡过程的基本形式	198
二、系统的性能指标	200
小 结	201
习 题	201
附 录	
附录一 半导体器件型号命名方法	203
附录二 常用半导体器件的主要参数	204
附录三 集成电路型号命名	207
附录四 国内外集成运放同类产品型号对照表	208
附录五 F007集成运放、W7800集成稳压电源原理电路图	209
附录六 逻辑代数运算法则	209
习题选答	211

第一章 基本放大电路

§ 1-1 PN结及其单向导电性

一、半导体知识简介

有关半导体的知识在物理学中已经学过了，现只作简单复习。

1. 半导体中的载流子

在半导体器件中，使用最多的半导体材料是锗和硅，它们都是四价元素，在原子最外层轨道上有四个价电子。纯净的单晶半导体最外层价电子形成共价键结构，如图1-1所示。在受到热（或光照等）的作用时，部分电子获得足够能量而逸出成为自由电子，同时在原来共价键中留下一个空位子，称为空穴。在半导体中存在着两种导电粒子（载流子），一种是带负电荷的自由电子（简称电子），另一种是带正电荷的空穴。

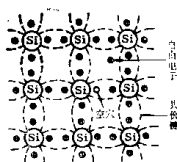


图1-1 共价键示意图

在纯净的半导体中，电子与空穴是成对出现的，在运动过程中如果自由电子填补了空穴，则电子和空穴就成对消失，这种现象称为复合。在一定的温度下，电子、空穴对的产生与复合都是不停地进行的，最终处于一种平衡状态，使半导体中载流子的浓度保持一定。但随温度升高，电子、空穴对的浓度增加，一般说来每升高 10°C 左右，载流子浓度增加一倍。

2. 杂质半导体

在纯净半导体中掺入微量杂质，就会使半导体导电性能发生显著改变。因掺入杂质的不同，可分为N型半导体和P型半导体两类。

1) N型半导体

在硅（或锗）晶体中掺入五价杂质（如磷、砷等），就成为N型半导体。五价杂质替代了晶体中某些硅原子的位置，它的五个价电子中有四个与周围的四个硅原子形成共价键，多余一个电子处于共价键之外，在室温下很容易被激发成为自由电子，同时杂质原子变成带正电的离子，图1-2 a为其示意图。可以看出，每掺入一个五价杂质原子，半导体中就多一个电子。如果掺入百万分之一的五价杂质，则电子载流子的浓度就增加一百万倍。由于电子的增加，与空穴复合的机会增加，N型半导体中的空穴就大大减少，因此在N型半导体中电子数远远大于空穴数，故N型半导体中多数载流子（简称多子）是电子，少数载流子（简称少子）是空穴，多子数取决于掺杂浓度，少子数取决于温度。

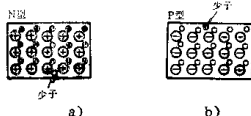


图1-2 杂质半导体示意图

2) P型半导体

在硅（或锗）的晶体中掺入三价杂质（如硼、铟等），就成为P型半导体。三价杂质的三个价电子与周围硅原子形成共价键时，出现了一个空穴。在室温下，这些空穴能吸引临近的价电子来补充，使杂质原子变成带负电的离子，图1-2b为其示意图。因此P型半导体的多子是空穴，它的多少取决于掺杂浓度，少子是电子，它的多少取决于温度。

二、PN结

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，则在这两种半导体交界面附近形成了PN结，它是构成各种半导体器件的基础。

1. PN结的形成

由于P型半导体中多子是空穴，N型半导体中多子是电子，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1-3所示。空间电荷区内形成了一个方向为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，漂移是指在电场作用下的少数载流子定向运动。因此，N区的空穴向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，空间电荷区的宽度相对稳定，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结中电流为零。

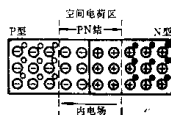


图1-3 PN结

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，空间电荷区宽度是恒定值。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) 外加正向电压

在图1-4中，P区接电源正极，N区接电源负极（称为正向偏置）。此时在外电源的作用下，多子被推向耗尽层，结果使空间电荷区变窄，内电场被削弱，有利于多子的扩散，而不利于少子的漂移。多子的扩散电流通过回路形成正向电流，这时称PN结导通。导通时PN结两端电压只有零点几伏，所以不大的正向电压就可产生相当大的正向电流 I_F ，通常在回路中串入一个电阻 R 以限制电流。

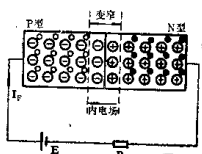


图1-4 外加正向电压时的PN结

2) 外加反向电压

在图1-5中，P区接电源负极，N区接正极（称反向偏置），此时外电场使空间电荷区变宽，加强了内电场，阻止多子的扩散，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_s 。因少子的浓度很低，并在温度一定时浓度不变，所以反向电流不仅很小，且当外加电压超过零点几伏后，由于少子数量有限基本上不随外加电压增加而增加，故称反向饱和电流。

总之，当外加正向电压时，PN结导通，呈现为一个小电阻，流过较大的正向电流。外加反向电压时，PN结呈现为一个很大的电阻，流过很小的反向电流，可认为PN结是截止的。其特性称为PN结的单向导电性。

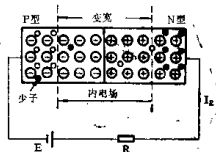


图1-5 外加反向电压时的PN结

〔练习与思考〕

1-1-1 既然PN结两端存在着内电场，即有内电位差，若将二极管短路是否有电流通过？

§1-2 半导体二极管

半导体二极管也叫晶体二极管，简称二极管。它是由一个PN结加上引线 and 管壳构成的。接在P型半导体端的电极叫阳极(正极)，用A表示，接在N型半导体端的电极叫阴极(负极)，用K表示。二极管的符号如图1-6所示。

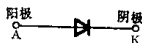


图1-6 二极管符号

一、二极管的特性

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，实际的二极管伏安特性如图1-7所示。下面对二极管特性分三部分加以说明。

1. 正向特性

对应于图1-7的第①段为正向特性。在正向电压较小时，外电场还不足以克服PN结的内电场，因此这时的正向电流几乎为零，只有在外加电压超过一定数值后，才有明显的正向电流，该电压值称死区电压。在室温下，硅管死区电压约为0.5V，锗管约为0.1V。当正向电压大于死区电压时，内电场被大大削弱，电流随电压增长很快。正向导通且电流不大时，硅管压降约为0.6~0.8V，锗管约为0.2~0.3V。

2. 反向特性

图1-7的第②段为反向特性，在反向电压作用下，少数载流子很容易通过PN结，形成反向饱和电流。但由于少子的数目很少，所以反向电流是很小的。小功率硅管的反向电流一般小于0.1μA，而锗管通常为几十微安。

温度升高时由于少子的增加，反向电流将随之增加。

3. 反向击穿特性

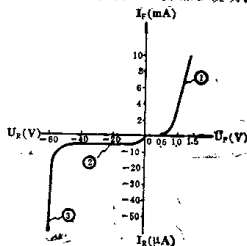


图1-7 2CP10的伏安特性

当反向电压增加到一定数值时,反向电流剧增。这时由于外加电压在PN结中形成很强的电场,并产生大量的电子、空穴对,引起反向电流急剧增加,这种现象叫反向击穿,对应于图1-7的第③段。

二极管的特性对温度很敏感,随温度升高正向特性曲线向左移,反特性曲线向下移。

如图1-8所示。变化规律是:在室温附近,温度每升高 1°C ,正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$;温度每升高 10°C ,反向电流均增加一倍。硅二极管允许工作温度为 $150\sim 200^{\circ}\text{C}$,锗二极管只允许工作在 100°C 以下,因此大功率二极管几乎都用硅制造。

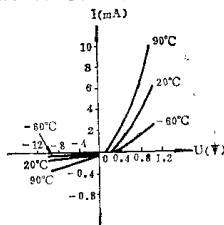


图1-8 温度对二极管特性影响

二、二极管的主要参数

二极管的特性还可用参数来定量描述,它是正确使用和合理选择器件的依据。二极管的主要参数有下面几个。

1. 最大整流电流 I_F

指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流,它是由PN结的结面积和外界散热条件所决定的。实际应用时,二极管的平均电流不允许超过此值,并要满足散热条件,否则会烧坏二极管。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

指二极管在使用时允许加上的最高反向电压,超过此值二极管就有发生反向击穿的危险。通常取反向击穿电压的一半作为 U_{RM} 。

3. 反向电流 I_R

指在室温条件下,二极管未击穿时的反向电流值,此值越小,二极管的单向导电性越好。反向电流与温度有密切关系,所以使用二极管时要注意温度的影响。

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,结电容的大小也相应改变。

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结的单向导电性,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。

值得注意的是:由于制造工艺的限制,即使是同一型号的管子,参数的分散性也很大。有关电子器件手册中往往是给出参数的范围,而参数是在一定的测试条件下测得的,应用时要注意这些条件,若条件改变时,相应的参数值也会发生变化。

【例1-1】在图1-9 a电路中,已知 $u_i = 10\sin\omega t \text{ V}$, $E = 5\text{V}$, $R = 1\text{ k}\Omega$,二极管的正向压降和反向电流均忽略不计,试画出 u_o 的波形。

解 已知 u_i 是按正弦规律变化的,当 $u_i < E$ 时,二极管反向截止,相当于开路, $u_o = u_i$ 。

即 u_o 随 u_i 变化, 当 $u_i > E$ 时, 二极管正向导通, 相当于短路, $u_o = E$ 。 u_o 的波形为图1-9 b所示, 作图时应注意 u_o 和 u_i 间的对应关系。

〔例1-2〕试判断图1-10中二极管是导通还是截止? 为什么?

解 要判断二极管导通与截止, 主要看二极管是处于正向偏置, 还是反向偏置。可先将二极管除去, 分别计算管子两极A点与B点电位, 计算结果如是 $V_A > V_B$ 则二极管导通, 如果 $V_A < V_B$ 则二极管截止。

图中除去二极管后

$$V_A = \frac{10}{140 + 10} \times 15 = 1 \text{ V}$$

$$V_B = -\frac{2}{18 + 2} \times 10 + \frac{5}{25 + 5} \times 15 = 0.5 \text{ V}$$

$$V_A > V_B$$

因此二极管2AP1导通。

〔练习与思考〕

1-2-1 怎样使用万用表来判断二极管的正负极与好坏?

§ 1-3 特殊二极管

除了上述普通二极管外, 还有一些特殊二极管, 如稳压二极管、光电二极管、发光二极管等, 分别介绍如下。

一、稳压二极管

1. 稳压二极管的稳压作用

稳压二极管(简称稳压管)是一种特殊的二极管。它的符号、伏安特性如图1-11所示。稳压二极管正常工作于反向击穿区, 且在外加反向电压撤除后, 管子还是正常的, 并未损坏, 这种性能称为可逆性击穿。当然, 如果反向电流太大, 超过允许的最大值, 则管子会因过热而烧坏, 为此稳压管必须串联一个合适的限流电阻后再接入电路。

稳压管的正向特性与普通二极管基本一样, 正向压降约为0.6V。但它的反向击穿特性更陡些。图

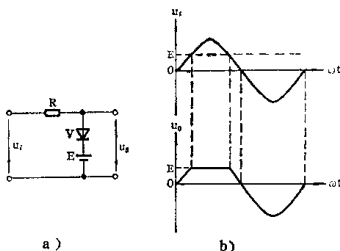


图1-9 例1-1图

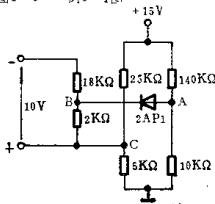


图1-10 例1-2图

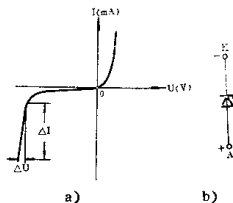


图1-11 稳压管

1-11中的 U_z 表示反向击穿电压,即稳压管的稳定电压,稳压管的稳压作用在于:工作在稳压区时,当流经管内的电流变化很大时,它的端电压变化很小。特性曲线愈陡,稳压管的稳压性能愈好。

2. 稳压管的主要参数

1) 稳定电压 U_z 指稳压管中电流为规定值时,稳压管两端的电压值。由于工艺方面的原因,即使同一型号的稳压管, U_z 的分散性也较大。例如2CW14型稳压管的 U_z 在6~7.5V之间(测试电流为10mA)。不同型号的稳压管其稳压值可由1.5V到300V。

2) 稳定电流 I_z 它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,只要不超过额定功耗都可以正常工作,且电流愈大,稳压效果愈好,但管子的功耗要增加。

3) 动态电阻 R_z 它是稳压管两端电压的变化量 ΔU_z 与相应的电流变化量 ΔI_z 之比, $R_z = \Delta U_z / \Delta I_z$ 。 R_z 随工作电流不同而变化,电流越大, R_z 越小。例如2CW7C型稳压管的工作电流为5mA时, $R_z = 18\Omega$;10mA时为8 Ω ;20mA时为2 Ω 。

4) 电压温度系数 α 稳压管的稳定电压值随工作温度不同而有所变化,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 α 为+0.09%/°C,表示温度每升高1°C,其稳压值将增加0.09%。硅稳压管 U_z 低于4V时具有负温度系数;高于7V具有正温度系数;而在4~7V之间时,温度系数很小。

5) 最大耗散功率 P_{zM} 指管子不致于产生过热损坏时的最大功率损耗值,它等于 $P_{zM} = I_{zM}U_z$ 。

【例1-3】在图1-12电路中,稳压管的参数为 $U_z = 12V$ $I_{zM} = 18mA$,为使管子不致烧坏,限流电阻取值应为多少?

$$\text{解} \quad R \geq \frac{U_s - U_z}{I_{zM}} = \frac{20 - 12}{18} = 0.44k\Omega$$

几种常见稳压管的主要参数见附录二。

3. 稳压管的应用

图1-13是由稳压管V和限流电阻R组成的最简单的稳压电路。交流电源电压经整流、滤波后的直流电压 U_i 作为稳压电路的输入,稳压电路的输出是负载 R_L 两端的电压 U_o ,即稳压管两端的电压 U_z 。当电网电压波动引起 U_i 上升时,势必引起 U_o 增加,则流过稳压管的电流 I_z 便大大增加,于是 $I = I_z + I_L$ 增加很多,电阻R上的压降相应增加致使负载电压 U_o 下降而基本保持不变,就是说, U_i 的增量绝大部分降在R上,从而保持了 U_o 的基本稳定。反之,当 U_i 下降时,同样可保证 U_o 的稳定,读者可自行分析。

同理,当负载 R_L 变动时,它也能起到稳定输出电压的作用。例如,当 R_L 减小使 I_L 增加时, U_o 也将减小。但 U_o 的减小使稳压管的工作电流 I_z 大大减少,R上通过的电流也跟着减小,R两端电压降减小,就使 U_o 回升而保持输出电压基本不变。实际上,负载电



图1-12 例1-3图

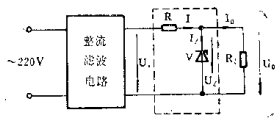


图1-13 稳压管稳压电路

流的增加是由稳压管电流的减少来补偿的,使通过 R 的电流 I 基本不变,输出电压 U_o 也就稳定了。

综上所述,这种稳压电路的实质在于利用稳压管工作在反向击穿区时,其端电压略有变化而使电流变化很大的特性,配合电阻 R 的调整作用来实现稳压的。

〔练习与思考〕

1-3-1 在图1-14电路中,稳压管 $U_z = 14V$, $I_{zM} = 18mA$, [(1) 当 $U_i = 30V$, 分别计算SA断开与闭合时各支路电流; (2) 当 $U_i = 32V$, 分别计算SA断开与闭合时各支路电流。 [(1) 16mA, 16mA, 0; 16mA, 7mA, 9mA。 (2) 18mA, 18mA, 0; 18mA, 7mA, 1mA。]

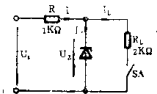


图1-14 练习与思考1-3-1电路

二、光电二极管

光电二极管的特点是,当光线照射于它的PN结的时候,象热激发一样,也可以成对地产生电子和空穴,在半导体中提高了少子的浓度。这些载流子在反向偏置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强度的增加而增加。光电二极管的管壳上备有一个玻璃窗口,以便于接受光照。图1-15a是光电二极管的符号,图b是它的特性曲线。灵敏度的典型值为 $0.1\mu A/1x^\ominus$ 数量级。

光电二极管可以用来作为光控元件,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,能够直接把光能变成电能。

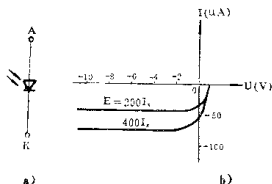


图1-15 光电二极管

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。发光二极管常用元素周期表ⅢA及ⅤA族元素化合物,如砷化镓、磷化镓等制成。图1-16表示发光二极管的电路符号。几种常见的发光材料主要参数如表1-1所示。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,工作电流一般为几毫安至几十毫安之间。



图1-16 发光二极管符号

$^\ominus lx$ (勒克斯) 为光照 (E) 的单位。

表 1-1 发光二极管的主要特性

颜色	波 长 (nm)	基本材料	正向电压 (10mA时)V	光 功 率 (μW)	光 强 (10mA时,张角 $\pm 45^\circ$ (mcd) $\ominus$
红 外	900	砷化镓	1.3~1.5	100~500	
红	655	磷砷化镓	1.6~1.8	1~2	0.4~1
鲜 红	635	磷砷化镓	2.0~2.2	5~10	2~4
黄	583	磷砷化镓	2.0~2.2	3~8	1~3
绿	565	磷化镓	2.2~2.4	1.5~8	0.5~3

$\ominus$ cd——发光强度的单位。

§ 1-4 半导体三极管

半导体三极管又称晶体管，图 1-17a 为其结构示意图。从图中可看出，它有三个区分别

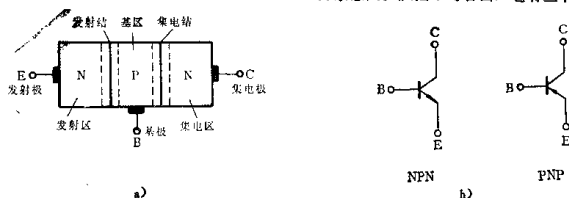


图1-17 晶体三极管

称发射区、基区和集电区。三个区分别引出三个电极，即发射极 (E)、基极 (B) 和集电极 (C)，有两个PN结，发射区和基区间的PN结称发射结，集电区和基区间的PN结称为集电结。这种由两个N型区中间夹一个P型区的半导体管称为NPN管。还有一种由两个P型区中间夹一个N型区的半导体称为PNP管。两种类型管子的符号见图 1-17b。它们在使用时的电源极性相反。

晶体管内部结构上的特点是：发射区掺杂浓度高，即多子浓度高；基区很薄且杂质浓度低；集电区体积大，掺杂浓度较低。这是晶体管具有电流放大作用的内因。

一、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电流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，这可由图 1-18 所示电路来实现。为了简要说明电流放大作用，忽略一些次要因素。下面以NPN管为例简述如下。

由于发射结正向偏置，发射区杂质浓度高，所以发射区的多子 (电子) 源源不断地越过发射结到达基区，形成发射极电

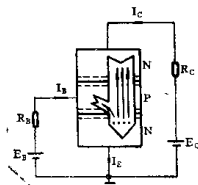


图1-18 晶体管内部电流分配

流 I_E 。到达基区的电子，由于浓度差，要继续向集电结扩散，在扩散过程中有部分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 。但由于基区很薄，且空穴浓度很低，所以 I_B 很小。而绝大部分电子能扩散到集电结的边沿，由于集电结是反向偏置，所以扩散到集电结边沿的电子在电场作用下，很容易漂移到集电区，形成集电极电流 I_C 。

从以上分析可看出： $I_E = I_B + I_C$ ，且 $I_C \gg I_B$ ，这就是晶体管的电流放大作用。而把 I_C 与 I_B 之比称为直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-1)$$

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

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-2)$$

二、晶体管的特性曲线

晶体管和二极管一样也是非线性元件，通常用特性曲线来反映其性能。晶体管特性指标间电压和各极电流间的关系曲线，它的特性曲线有输入和输出两组。图1-19是3DG6硅晶体

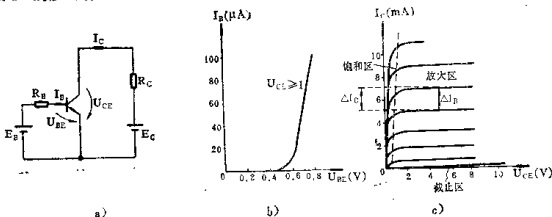


图1-19 三极管特性

管共发射极连接时的输入和输出特性曲线。下面以此为例介绍一下晶体管的特性曲线。

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

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

图1-19b所示是 $U_{CE} = 1\text{V}$ 时的输入特性，它与二极管正向特性相似，因为B、E间是正向偏置的PN结。当 $U_{BE} \geq 1\text{V}$ 后，B、C间PN结的反向偏置电压已足以将扩散到基区的电子绝大部分收集到集电区，因而 U_{CE} 对 I_B 的影响甚小，所以 $U_{CE} > 1\text{V}$ 时的输入特性与 $U_{CE} = 1\text{V}$ 时的曲线可认为是重合的。

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 U_{CE} 间的关系。

$$I_C = f(U_{CE}) \mid I_B = \text{常数}$$

图1-19c是输出特性曲线，它可以划分为以下三个区域，对应于晶体管的三种工作状态。

1) 截止区

当 U_{BS} 小于死区电压时, $I_B = 0$, 相应 $I_C = I_{C_{EO}}$ (称为穿透电流), 说明集电极仍有一微小的漏电流。如果使发射结反偏, 则集电极电流接近于零, 这时的晶体管呈高阻状态, 相当于开关断开。因此, 在需要管子可靠截止时, 常使发射结反偏。通常可以说发射结反向偏置时, 晶体管是截止的, 习惯上认为 $I_B = 0$ 的曲线以下的区域称截止区。

2) 放大区

发射结为正偏置, 集电结为反向偏置区域称为放大区。此时集电极电流 I_C 与电压 U_{CE} 几乎无关, 特性曲线近似与横轴平行, 就是说, 当 I_B 一定时, I_C 也就基本不变。 I_C 与 I_B 的关系是 $I_C = \beta I_B + I_{C_{EO}}$ 。它的特点是: I_C 的大小受 I_B 控制, 当 I_B 变化 ΔI_B 时, I_C 也就相应地变化 ΔI_C , 且 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$, $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \gg 1$ 。

性能好的晶体管该区域曲线近于平行等距, 且 $I_{C_{EO}}$ 很小, 这时 $\beta \approx \bar{\beta}$ 。由于制造工艺的分散性, 同一型号的晶体管 β 值也有很大区别, 常用的晶体管 β 值在20~100之间。

3) 饱和区

曲线靠近纵轴的区域是饱和区。当 $U_{BS} > U_{CES}$ 时, 集电结处于正向偏置, 这就不利于集电区收集从发射区到达基区的电子, 使得在相同 I_B 时, I_C 的数值比放大状态时小, $I_{CS} < \beta I_B$ (I_{CS} 是集电极临界饱和电流)。这时 I_C 不再受 I_B 控制而取决于 E_C 和 R_C 。即

$$I_{CS} = \frac{E_C - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{E_C}{R_C} \quad (1-3)$$

U_{CES} 为饱和时C、E间的电压降, 称饱和压降, 小功率硅管约为0.3V, 锗管约为0.1V。晶体管饱和时, 集电结和发射结均处于正向偏置, 晶体管呈现低电阻状态, $U_{CES} \rightarrow 0$, 相当于开关闭通。

由于 $U_{CE} = E_C - I_C R_C$, 故增加 I_C 或 R_C 都可以使晶体管处于饱和状态, 工程上定义 $U_{CE} = U_{CES}$ 时为临界饱和。

工作于饱和及截止状态下的晶体管都失去了放大作用, 常用于数字开关电路中, 这是晶体管的非线性应用。而放大区特性基本上是平行等距的, $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 则可视作线性的, 常用于线性放大电路。

【例1-4】在图1-19a中, 已知 $E_C = 10V$, $E_B = 5V$, $R_C = 3k\Omega$, $R_B = 200k\Omega$, $\bar{\beta} = 100$, 求 I_B , I_C , 并验算其是否处于放大状态; 如果将 R_B 减少到100k Ω , 是否处于放大区 (设 $U_{CES} = 0.7V$)。

解 发射结正偏, 则可能工作于放大区或饱和区。若工作在放大区, 则有

$$I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{200} = 0.0215mA = 21.5\mu A$$

$$I_C = \bar{\beta} I_B = 2.15mA$$

由图中可得

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C = 10 - 2.15 \times 3 = 3.55V > U_{CES}$$

说明集电结反偏, 故晶体管工作于放大状态。

如果将 R_B 减到 $100\text{k}\Omega$, 则

$$I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{100} = 0.043\text{mA} = 43\mu\text{A}$$

在晶体管饱和时, 集电极电流 I_{CS} 为

$$I_{CS} \approx \frac{E_C}{R_C} = \frac{10}{3} = 3.33\text{mA}$$

在临界饱和时, 基极电流 I_{BS} 为

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{3.33}{100} = 0.033\text{mA} = 33\mu\text{A}$$

可见

$$I_B > I_{BS}$$

因此管子处于饱和状态。

三、主要参数

晶体管的主要参数除了前面讲到的电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 β 外, 还有以下几个。

1. 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO} 指发射极开路时, 集电结反偏时的电流, 它本质上就是PN结的反向饱和电流。良好的晶体管 I_{CBO} 应该是很小的, 一般小功率硅管为 $1\mu\text{A}$ 以下, 锗管为几微安至几十微安。它是由少数载流子漂移形成的, 因此受温度影响较大, 是造成管子工作不稳定的主要因素。

2. 穿透电流 I_{CEO} 是指基极开路时($I_B = 0$), 流过集电极和发射极之间的电流, 如图1-20所示。由于它好像是从集电极直接穿透管子而到达发射极的, 故称为穿透电流, 可以证明其值为 $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$ 。

晶体管工作在放大区时, 集电极电流 $I_C = \beta I_B + I_{CBO}$, 当温度升高时, I_{CBO} 增加很快, I_{CEO} 增加得更快, 使 I_C 也相应增加, 造成晶体管的温度稳定性差。

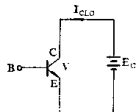


图1-20 穿透电流

3. 极限参数

1) 集电极最大电流 I_{CM} 当集电极电流 I_C 过大时, β 将下降, 通常取 β 值下降到正常值的2/3时, 所对应的集电极电流为 I_{CM} 。当 $I_C > I_{CM}$ 时, 管子并不一定会损坏。一般小功率管 I_{CM} 为几十毫安, 大功率管则在几安以上。

2) 集-射反向击穿电压 $U_{CES(B)}$ 是指当基极开路时, 加在集电极和发射极间的最大的允许工作电压。从图1-21输出特性曲线可看到, 当管子所加的 U_{CE} 超过 $U_{CES(B)}$ 时就会引起 I_C 急剧增加, 从而造成管子集电结反向击穿。因此管子工作时 $U_{CE} < U_{CES(B)}$ 才安全。

3) 集电极最大允许功耗 P_{CM} 这个参数决定于管子的温升, 使用时不能超过, 而且要注意散热条件。一个管子的 P_{CM} 如已确定, 则 $P_{CM} = I_C \cdot U_{CE}$, 可知临界损耗时 I_C 与 U_{CE} 在输出特性上的关系为一双曲

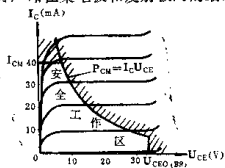


图1-21 晶体管安全工作区