

普通高等教育机电类规划教材

电子技术

(电工学Ⅱ)

第3版

罗会昌 周新云 主编

普通高等教育机电类规划教材

电子技术

(电工学Ⅱ)

第2版

李金柱 陈永昌 主编

机械工业出版社



普通高等教育机电类规划教材

电 子 技 术

(电 工 学 II)

(第 3 版)

罗会昌 周新云 主编



机械工业出版社

本套教材是为适应教学和科技发展新形势的需要而编写的。分《电工技术》、《电子技术》两册出版。

《电子技术》共分为六章,即基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流电源、晶闸管电路、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路。在大部分节后配有练习思考题,每章均有小结和习题。本书末附有部分常用电子器件的数据和部分习题答案。本书电路图形符号和文字代号均采用新的国家标准。

本书读者对象是机电类专业的大学生,亦可供其他非电专业的大学生使用,并可作为工程技术人员系统学习电子技术的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术 (电工学Ⅱ)/罗会昌,周新云主编.—3版.
—北京:机械工业出版社,2004.3
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-01702-1

I.电… II.①罗…②周… III.①电工学—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV.TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第017247号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:曾红 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新
封面设计:姚毅 责任印制:闫焱
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2004年4月第3版·第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·13.75印张·337千字
0 001—4 000册
定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

《电子技术》是在原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组织与领导下编写的,并得到了原机械电子工业部高教司的支持与关怀。自1979年以来,协作组每一年或两年举行一次学术年会,在每次年会上都把教材建设放在很重要的地位。1997年8月协作组又在张家界召开了《电工技术》、《电子技术》编审会议。会后对本教材进行了修订再版。为适应电子技术发展和21世纪教育改革的新形势,现在对本教材再次进行修订再版。由于原来的一些编审人员工作有所变动,经过协商,此次修订再版时,编审人员有一些调整。本书编写的指导思想、内容取舍及完整体系的建立都是由协作组组织各院校经过多次研讨和反复审核后确定的。因此,本书实际上是原机械电子工业部部内及部外多所高等院校电子技术课程教师的集体成果。

电子技术是一门重要的技术基础课。《电子技术》一书的使用对象是机电类专业的大学生及其他非电专业的大学生,亦可供工程技术人员学习使用。本书是按60~70学时(包括实验学时)类型编写的。对于授课学时较少的专业,可选择其中部分内容进行教学。讲授与实验的比例约为5:2。

本着“精选内容、打好基础、加强实验、培养能力”的宗旨,编者把教材的重点放在基本理论、方法、概念和电子器件的外部特性及其应用知识等方面,并适当提高了起点,避免与物理学中的有关内容出现不必要的重复。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,书中编写了一些选修内容(标题前注*号),教学时可根据需要选用。本书的电路图形符号和文字代号均采用新的国家标准。

本书共分六章。第一章由西安理工大学孙强编写;第二章及附录由合肥工业大学刘春编写;第三章由甘肃工业大学缙新科编写;第四章由太原重型机械学院王皖贞编写;第五章由江苏大学周新云编写;第六章由江苏大学赵不赕编写;新旧电气图形符号及文字符号对照表由西安理工大学李炳彦编写。本书由罗会昌担任第一主编,周新云担任第二主编。罗会昌负责全书的修稿和定稿。参加本书审阅的有沈阳工业大学范振铨,江苏大学陈正传,西安理工大学赵敏玲,安徽建筑工业学院蒋中,河南科技大学程传洛,桂林电子工业学院黄知超。全书由合肥工业大学杨杰担任主审。主审和审稿者认真审阅了书稿,并提出了许多宝贵建议,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

第一章 基本放大电路 1

第一节 PN 结 1

第二节 半导体二极管 3

第三节 特殊二极管 6

第四节 半导体三极管 8

第五节 基本放大电路 13

第六节 微变等效电路分析法 19

第七节 多级放大器及频率特性 24

第八节 共集电极放大电路
(射极输出器) 28

第九节 光耦合器 30

第十节 互补对称功率放大电路 31

第十一节 场效应晶体管放大电路 35

* 第十二节 VMOS 管简介 39

小结 41

习题 41

第二章 集成运算放大器及其应用 46

第一节 直接耦合放大器 46

第二节 差动放大器 47

第三节 集成运算放大器简介 51

第四节 集成运放电路中的负反馈 54

第五节 集成运放在信号运算
电路中的应用 62

第六节 集成运放在信号处理
电路中的应用 70

第七节 集成运放在信号发生
电路中的应用 73

第八节 集成运放的选择与使用 78

第九节 集成运放应用实例 80

小结 82

习题 82

第三章 直流电源 88

第一节 整流电路 88

第二节 滤波电路 94

第三节 串联型稳压电路 98

第四节 集成稳压器 99

小结 104

习题 105

第四章 晶闸管电路 108

第一节 晶闸管 108

第二节 可控整流电路 111

第三节 晶闸管的触发电路 116

* 第四节 晶闸管无源逆变电路 120

* 第五节 晶闸管的保护 121

* 第六节 晶闸管电路应用实例 123

小结 126

习题 127

第五章 门电路和组合逻辑电路 129

第一节 概述 129

第二节 分立元件门电路 130

第三节 TTL 集成门电路 133

第四节 MOS 集成门电路 136

第五节 逻辑门电路使用中
的实际问题 139

第六节 逻辑代数 142

第七节 组合逻辑电路的
分析和设计 144

第八节 组合逻辑电路的应用 148

* 第九节 只读存储器 (ROM) 和可编程
逻辑器件 (PLD) 154

小结 164

习题 165

第六章 触发器和时序逻辑电路 169

第一节 双稳态触发器 169

第二节 寄存器 174

第三节 计数器 177

第四节 555 定时器及其应用 182

第五节 模拟量和数字量的转换	186	主要参数	201
第六节 数字电路应用实例	190	附录三 集成电路型号命名	208
小结	192	附录四 几种集成运放的 主要参数表	209
习题	193	附录五 常用集成稳压器 W7800 和 W7900 系列的主要参数	209
新旧符号对照表	198	部分习题答案	210
附录	200	参考文献	212
附录一 半导体器件型号命名方法	200		
附录二 常用半导体器件的			

第一章 基本放大电路

在各种电子装置中，采用的放大电路是多种多样的，而单管放大电路是构成各种复杂放大电路的基本单元。本章首先介绍与放大电路相关的电子元器件，然后以晶体三极管组成的几种放大电路为例，介绍放大电路的组成原则、工作原理、性能指标及分析计算方法。

第一节 PN 结

一、半导体

有关半导体的基本知识在物理学中已有介绍，这里只作简要概述。

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，在其原子最外层轨道上有 4 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，少数的价电子获得足够能量可挣脱原子核的束缚（电子受到激发）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。在电场作用下，电子形成电子流，空穴形成空穴流，二者之和即为半导体中的电流。

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在不停地进行，但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，随温度升高，载流子浓度增加，温度每升高 10°C 左右，载流子浓度约增加一倍。

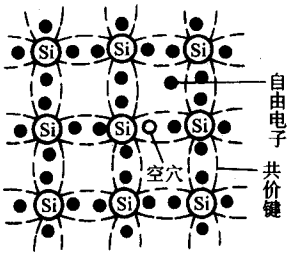


图 1-1 共价键示意图

2. 杂质半导体

在纯净半导体中掺入相关的微量杂质元素，就会使半导体导电性能发生显著改变。因掺入杂质的不同，杂质半导体可分为两大类。

(1) N 型半导体 在硅（或锗）晶体中掺入五价元素（如磷、砷等），就成为 N 型半导体，五价元素替代了晶体中某些硅原子的位置，它的 5 个价电子中有 4 个与周围的 4 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，同时五价原子变成带正电的离子，如图 1-2a 所示。可以看出，每掺入一个五价原子，半导体中就多出一个自由电子。由于电子的增加，与空穴复合的机会增多，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

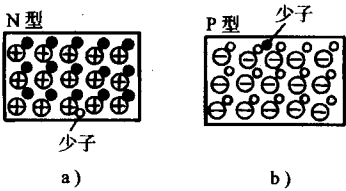


图 1-2 杂质半导体示意图

N 型半导体中多数载流子（简称多子）是电子，其数量主要取决于掺杂浓度；少数载流子（简称少子）是空穴，其数量主要取决于温度。

(2) P 型半导体 在硅（或锗）的晶体中掺入三价元素（如硼、铟等）就成为 P 型半导体。三价元素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，使三价原子变成带负电的离子，如图 1-2b 所示。因此 P 型半导体的多子是空穴，其数量主要取决于掺杂浓度；少子是电子，其数量主要取决于温度。

二、PN 结及其单向导电性

在一块半导体中，通过不同的掺杂工艺，使其一边成为 N 型半导体，另一边成为 P 型半导体，在这两种半导体交界面附近便形成了 PN 结，用这种 PN 结可以构成各种半导体器件。

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，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别。电子和空穴总是从高浓度的地方向低浓度的地方扩散，于是在两种半导体交界面附近 P 区的空穴必然向 N 区扩散，且与 N 区的电子复合而消失，在 P 区一侧留下不能移动的负离子空间电荷区。同样，N 区的电子也要扩散到 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 N 区指向 P 区的内电场，随着扩散的不断进行，空间电荷区不断加宽，内电场不断加强。内电场的作用阻碍多子扩散，故也称空间电荷区为阻挡层。因此由浓度差而产生的多子扩散作用和由扩散而产生的内电场对扩散的阻碍作用必然会达到动态平衡，使空间电荷区的宽度不再变化。另一方面，在内电场的作用下，少子产生运动，这种运动称为漂移，即 N 区的空穴向 P 区漂移，P 区的电子向 N 区漂移，其结果会使空间电荷区变窄，内电场被削弱，这又将引起多子扩散，加强内电场，最终仍会达到动态平衡。由此可见，在动态平衡状态下，扩散电流必然等于漂移电流，这时空间电荷区相对稳定，于是 PN 结形成。由于总的多子扩散电流等于少子漂移电流，且两者方向相反，故 PN 结中电流为零。

综上所述，在无外电场或其他因素激发时，PN 结处于相对稳定状态，没有电流通过，PN 结宽度一定。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（这种接法称为正向偏置，简称正偏）。此时在外电源的作用下，内电场被削弱，多子被推向耗尽层，结果使空间电荷区变窄，有利于多子的扩散，而不利于少子的漂移。多子扩散电流称为正向电流，这时称 PN 结导通。导通时 PN 结两端电压只有零点几伏，所以很小的正向电压就可产生很大的正向电流 I_F ，通常在回路中串入一个电阻 R 来限制电流。

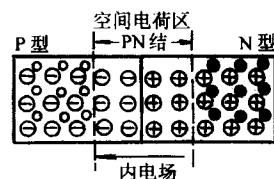


图 1-3 PN 结

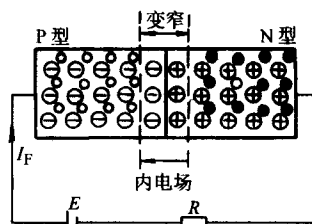


图 1-4 外加正向电压时的 PN 结

(2) 外加反向电压 在图 1-5 中, P 区接电源负极, N 区接电源正极 (这种接法称为反向偏置, 简称反偏), 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_R 。因少子的浓度很低, 并在温度一定时浓度不变, 所以反向电流很小, 由于少子数量有限, 当外加电压超过零点几伏后, 反向电流基本上不随外加电压的增加而增加, 故称之为反向饱和电流。

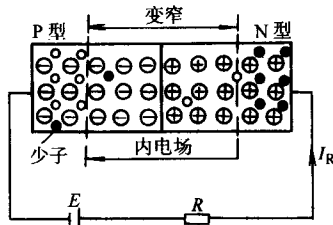


图 1-5 外加反向电压时的 PN 结

由以上分析可知: PN 结具有单向导电性, 即在 PN 结上加正向电压时, 正向电流较大 (PN 结电阻很小, 处于导通状态); 加反向电压时, 反向电流很小 (PN 结电阻很大, 处于截止状态)。

【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?

1-1-2 空间电荷区既然是由带电的正负离子形成的, 为什么它的电阻率很高?

第二节 半导体二极管

一、二极管的结构

半导体二极管也叫晶体二极管, 简称二极管。它是由一个 PN 结加上引线和管壳构成的。按 PN 结的面积大小可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管结构见图 1-6a。它的特点是结面积小, 因而结电容小, 适用于高频工作, 但不能通过很大的电流, 主要用作高频检波和脉冲电路里的开关元件。例如, 2AP1 是点接触型锗二极管, 最大整流电流是 16mA, 最高工作频率是 150MHz。

面接触型二极管结构见图 1-6b, 它的特点是结面积大, 因而能通过较大的电流, 但其结电容也大, 只能工作在较低频率下。例如, 2CZ56 是面接触型硅二极管, 最大整流电流 3A, 最高工作频率只有 3kHz。

二极管的符号如图 1-6c 所示。

二、二极管的伏安特性

二极管的导电性能常用伏安特性来表示, 它是

指二极管两端的电压 U 和流经二极管的电流 I 之间的关系, 图 1-7 示出了一只实际二极管的伏安特性曲线。

1. 正向特性

图 1-7 的第①段为正向特性曲线。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

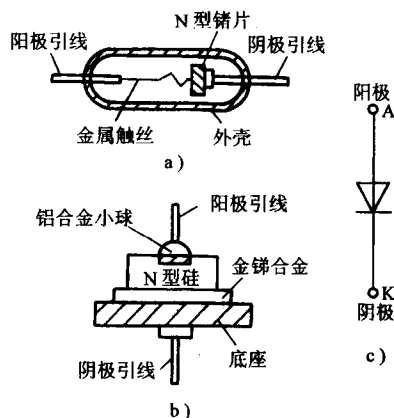


图 1-6 二极管的结构及符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 符号

流, 该电压值称为死区电压。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, 电流随电压增加而增长很快。正向导通且电流不大时, 硅管压降约为 $0.6\sim 0.8\text{V}$, 锗管压降约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

2. 反向特性

图 1-7 的第②段为反向特性曲线。在反向电压作用下, 少数载流子通过 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 $1\mu\text{A}$, 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 的第③段为反向击穿特性曲线。当反向电压增加到一定数值时, 反向电流剧增。这是由于外加电压在 PN 结中形成很强的电场, 并产生大量的电子、空穴, 引起反向电流急剧增加, 这种现象叫做反向击穿。

二极管的伏安特性对温度很敏感, 随温度升高正向特性曲线向左移, 反向特性曲线向下移, 如图 1-8 所示。变化规律是: 在室温附近, 温度每升高 1°C , 在同样的正向电流下, 正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$; 温度每升高 10°C , 反向电流约增加一倍。硅二极管允许的最高工作温度为 $150\sim 200^\circ\text{C}$, 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。

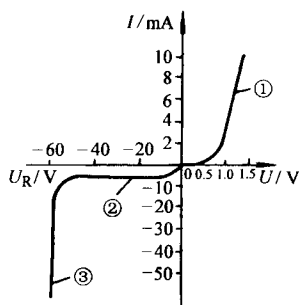


图 1-7 2CZ52A 的伏安特性曲线

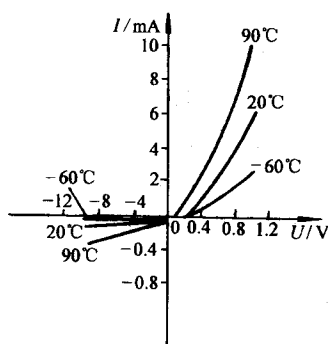


图 1-8 温度对二极管特性影响

三、二极管的主要参数

二极管的导电特性还可用参数来定量描述, 它是正确使用和合理选择二极管的依据。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施加的最高反向电压, 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窄时,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,允许工作频率低,结电容小的,允许工作频率高。

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给出的往往是参数的范围,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,相应的参数值也会发生变化。

【例 1-1】 在图1-9a电路中,已知 $u_i = 10\sin\omega t$ V, $E = 5$ V, $R = 1$ k Ω , 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 的波形如图 1-9b 所示,作图时应注意 u_o 和 u_i 间的对应关系。

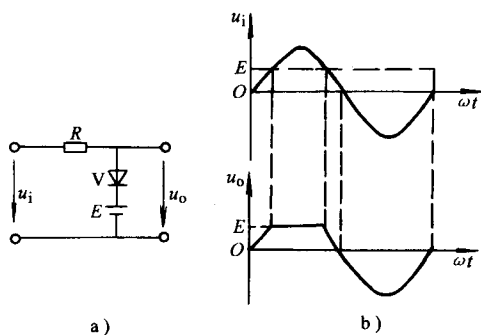


图 1-9 例 1-1 图

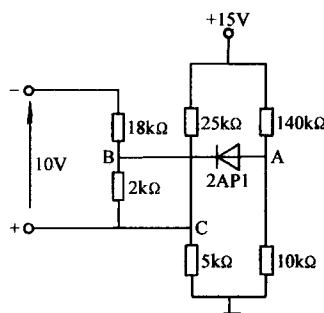


图 1-10 例 1-2 图

【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。如果 $V_A > V_B$, 则二极管导通;如果 $V_A < V_B$, 则二极管截止。

图 1-10 中除去二极管后

$$V_A = \frac{10\text{k}\Omega}{(140 + 10)\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 1\text{V}$$

$$V_B = -\frac{2\text{k}\Omega}{(18 + 2)\text{k}\Omega} \times 10\text{V} + \frac{5\text{k}\Omega}{(25 + 5)\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 1.5\text{V}$$

$$V_A < V_B$$

因此二极管 2AP1 截止。

【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？

第三节 特殊二极管

除了上述普通二极管外，还有一些按专门用途制造的特殊二极管，如稳压二极管、光敏二极管、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）是一种专门用来稳定电压的二极管，它的符号、伏安特性曲线如图 1-11 所示。稳压二极管通常工作在反向击穿区，且当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曲线更陡些。图 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，2CW55 型稳压管的 U_Z 为 6~7.5V（测试电流为 10mA）。

(2) 稳定电流 I_Z 指稳压管正常工作时的参考电流值。电流低于此值时，稳压效果变差；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 指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，2CW51 型稳压管的工作电流为 1mA 时， $R_Z = 400\Omega$ ；10mA 时为 60 Ω 。

(4) 电压温度系数 C_{TU} 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，2CW58 型稳压管 $C_{TU} \leq +8(10^{-4}/^{\circ}\text{C})$ ，表示温度每升高 1 $^{\circ}\text{C}$ ，其稳压值将增加 0.08%。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， $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$ 。

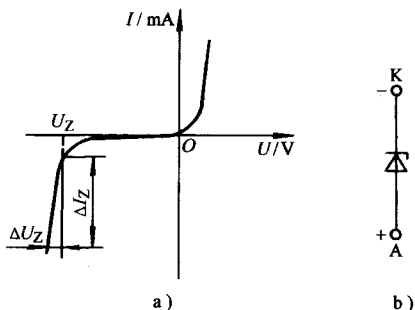


图 1-11 稳压管

a) 特性曲线 b) 符号

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

解
$$R \geq \frac{U_S - U_Z}{I_{ZM}} = \frac{(20 - 12)\text{V}}{18\text{mA}} = 0.44\text{k}\Omega$$

几种常见稳压管的主要参数见附录二。

3. 稳压管稳压电路

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。交流电压经整流滤波电路后得到的直流电压 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 $I = I_Z + I_o$ 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，而其值基本保持不变。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。

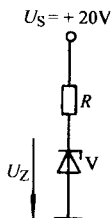


图 1-12 例 1-3 图

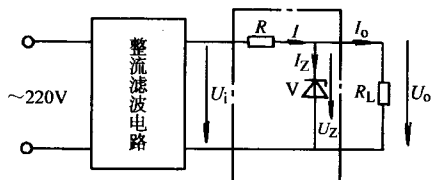


图 1-13 稳压管稳压电路

同理，当负载 R_L 变动时也能起到稳定输出电压的作用。例如，当 R_L 减小使 I_o 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 大大减小， 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。

二、光敏二极管

光敏二极管的特点是，当光线照射于它的 PN 结时，会像热激发一样，可以成对地产生电子和空穴，使半导体中少子的浓度提高。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，光敏二极管的管壳上备有一个玻璃窗口，以便于接受光照。图 1-14a 是光敏二极管的符号，图 b 是它的特性曲线。灵敏度的典型值为 $0.1\mu\text{A}/\text{lx}^\ominus$ 数量级。

光敏二极管可以用来作为光控元件，当制成大面积的光敏二极管时，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。

三、发光二极管

发光二极管的原理与光敏二极管相反。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

$\ominus$ lx (勒克斯) 为光照度的单位。

的基本材料决定。发光二极管常用元素周期表ⅢA族及ⅤA族元素化合物，如砷化镓、磷化镓等制成。图1-15是发光二极管的符号。几种常见发光材料的主要参数如表1-1所示。发光二极管常用来作为显示器件，工作电流一般为几毫安至几十毫安。

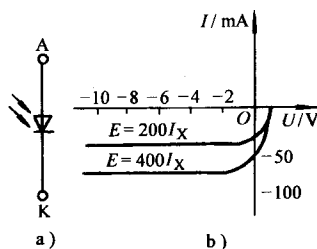


图 1-14 光敏二极管



图 1-15 发光二极管符号

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/V (10mA 时)	光功率 /μW	发光强度/mcd ^① (10mA 时, 张角 ±45°)
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

① cd 为发光强度的单位。

【练习与思考】

1-3-1 在图 1-16 电路中，稳压管 $U_Z = 14V$ ， $I_{ZM} = 18mA$ ，①当 $U_i = 30V$ ，分别计算开关 S 断开与闭合时的 I 、 I_Z 和 I_L ；②当 $U_i = 32V$ ，分别计算开关 S 断开与闭合时的上述电流。[①16mA, 16mA, 0; 16mA, 9mA, 7mA; ②18mA, 18mA, 0; 18mA, 11mA, 7mA]

1-3-2 利用稳压管或普通二极管的正向压降是否也可以稳压？

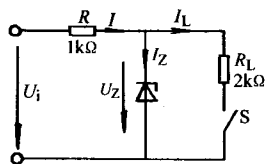


图 1-16

第四节 半导体三极管

半导体三极管又称晶体管，图 1-17a 为 NPN 型管的管芯结构图，图 1-17b 为其示意图。从图中可看出，它有三个区分别称为发射区、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 结称集电结。这种由两个 N 型区中间夹一个 P 型区的半导体三极管称为 NPN 管。还有一种由两个 P 型区中间夹一个 N 型区的半导体三极管称为 PNP 管。两种类型

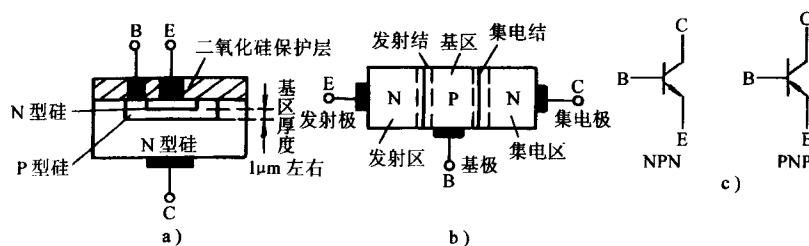


图 1-17 三极管

a) 管芯结构图 b) NPN 管示意图 c) 符号

管子的符号见图 1-17c。使用时，两种三极管的电源极性是相反的。

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，可由图 1-18 所示电路来实现。为了简要说明电流放大作用，忽略了一些次要因素。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，形成发射极电流 I_E 。由于浓度差，到达基区的电子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集电结电场作用下，很容易漂移到集电区，通过外电源 E_C 形成集电极电流 I_C 。

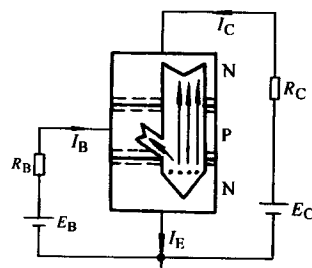


图 1-18 晶体管内部电流分配

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分配关系。当 I_B 有一增量 ΔI_B 时， I_C 也有相应的增量 ΔI_C ，且 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$ ，即一个较小的 ΔI_B 可以引起一个较大的 ΔI_C ，这就是所谓的电流放大作用。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

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

而把 I_C 与 I_B 之比称为直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ ，即

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

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。晶体管特性指极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 1-19a 中 E_B 、 R_B 、

B 、 E 组成输入回路, E_C 、 R_C 、 C 、 E 组成输出回路。由于输入和输出电路以发射极为公共端, 所以称为共发射极电路 (简称共射电路)。图 1-19b、c 是 3DG100 硅晶体管共发射极接法时的输入和输出特性曲线。下面以此为例介绍晶体管的特性曲线。

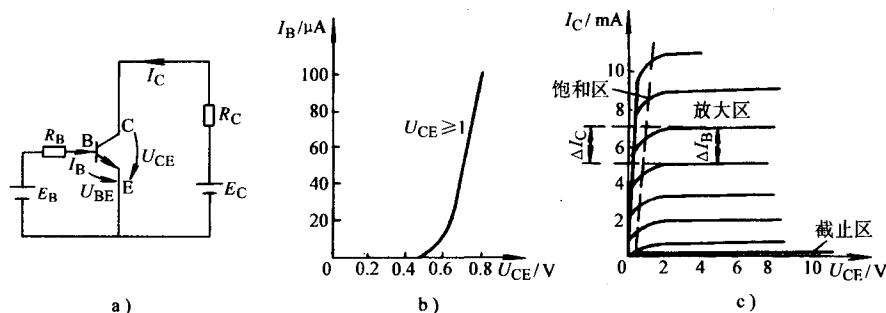


图 1-19 晶体管特性曲线

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

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

图 1-19b 所示是 $U_{CE} = 1V$ 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 $U_{CE} \geq 1V$ 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 $U_{CE} > 1V$ 时的输入特性曲线与 $U_{CE} = 1V$ 时的输入特性曲线可认为是重合的。

2. 输出特性

输出特性是指当 I_B 为某一固定值时, 输出电路中集电极电流 I_C 与 U_{CE} 间的关系, 即

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

图 1-19c 是晶体管的输出特性曲线, 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_{BE} 小于死区电压时, $I_B = 0$, 相应 $I_C = I_{CEO}$ (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, 这种状态称为晶体管工作在截止状态, 集射极之间相当于开关断开。因此, 在需要管子可靠截止时, 常使发射结反偏, 即当发射结反向偏置时, 晶体管是截止的。通常认为 $I_B = 0$ 曲线以下的区域为截止区。

(2) 放大区 当发射结为正偏、集电结反偏时, 晶体管工作在放大状态, 与这种状态所对应的区域称为放大区。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。考虑到有穿透电流存在, I_C 与 I_B 的关系是 $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$ 。放大区的特点是 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 $\Delta I_C \gg \Delta I_B$, $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \gg 1$ 。

性能好的晶体管放大区曲线近于平行等距, 且 I_{CEO} 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 值为 20~100。