

电力工业学校重点教材

电子技术(I)

成都水力发电学校 汪怡红 主编

China Electric Power Press

中国电力出版社

712
电力工业学校重点教材

电子技术 (I)

成都水力发电学校 汪怡红 主编



A1007027

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是按照中国电力企业联合会教育培训部 1996 年 11 月颁发的教学计划(试行)和电气类专业教研会组织审定过的教学大纲为依据进行编写的,与本书配套的教材有《电子技术(Ⅱ)》。

全书共分十二章,主要内容有:常用分立半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、反馈放大电路、集成运算放大器的运用、集成功率放大电路、直流电源、数字电路基础、集成逻辑门和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、数-模和模-数转换器。

本书由电力工业学校教材编审委员会确定为重点教材,是电力工业学校“发电厂及变电站电气运行与检修”专业(3、4 年制)“电子技术基础”课程的统编教材,也可作为高等职业学校大专、函授中等专业学校、技工学校同类专业“电子技术基础”课程的教材,还可供有关工程技术人员自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术(Ⅰ)/汪怡红主编.-北京:中国电力出版社,1999

电力工业学校重点教材

ISBN 7-5083-0009-2

I.电… II.汪… III.电子技术-专业学校-教材 IV.TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 05916 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

利森达印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 3 月第一版 2002 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 313 千字

印数 0001—3000 册 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

电子技术(I)是电力工业学校《发电厂及变电站电气运行与检修》专业(3、4年制)的一门主干课程,是按照中国电力企业联合会教育培训部1996年11月颁发的教学计划(试行)和电气类专业教研会组织审定过的教学大纲为依据进行编写的。

本书是电力工业学校教材编审委员会确定的重点教材。遵照电力职业技术教育课程改革的原则和基本思路,力求贯彻以能力为本位的思想。本书在取材和编写中,充分考虑了新型电力工业学校的教学特点,以基本分析方法为主,以定性分析为主,以外部特性和应用为主。以集成电路为核心,突出集成电路的应用。力图编写出一本思路清晰,叙述简洁,便于教学和自学,风格独特的教材。本书按课程总学时数约130(包括实验课)而编写,共分十二章。每章末列有思考题,便于学生对基本概念的理解。每章末还列有习题,以加强学生的计算能力和综合分析能力。本书将实验教学融于理论教学之中,使理论与实践得到有机的结合。

本书由成都水力发电学校汪怡红主编,并编写第一、二、三、四、五、八、十、十一章、全书的附录及除第九章外的全部实验;兰州电力工业学校刘庆恒编写第六、七章;哈尔滨电力工业学校张杰编写第九、十二章;全书由汪怡红统稿;由保定电力工业学校吉长祜主审。

在编写过程中得到成都水力发电学校赵大林同志、中国电力企业联合会教育培训部和电气类专业教研会的支持和帮助,谨表谢意。

对于书中存在的缺点和不足之处,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2000年3月

目 录

序	
前言	
第一章 常用分立半导体器件	1
第一节 半导体的基本知识	1
第二节 PN 结的单向导电特性	2
第三节 半导体二极管	3
第四节 晶体管	7
第五节 实验 半导体二极管和晶体管的简单测试	12
思考题	14
习题一	14
第二章 基本放大电路	17
第一节 共射极放大电路的工作原理	17
第二节 实验 常用电子仪器的使用	27
第三节 实验 单管放大电路的测试	28
第四节 射极输出器	30
第五节 多级放大电路	31
思考题	33
习题二	35
第三章 集成运算放大器	38
第一节 集成运算放大器的基本知识	38
第二节 差动放大电路	39
第三节 集成运算放大器及主要参数	42
第四节 实验 集成运算放大器参数的测试	45
思考题	46
习题三	47
第四章 反馈放大电路	49
第一节 反馈的基本概念	49
第二节 放大电路负反馈的类型	51
第三节 负反馈对放大电路性能的影响	52
思考题	54
习题四	54
第五章 集成运算放大器的应用	57
第一节 信号运算电路	57
第二节 实验 基本运算电路的测试	61

第三节	信号处理电路	62
第四节	正弦波振荡器	64
第五节	实验 RC 桥式正弦波振荡器	69
第六节	非正弦波发生器	69
第七节	实验 方波发生器	71
思考题	.....	72
习题五	.....	72
第六章	集成功率放大电路	75
第一节	功率放大电路的特点	75
第二节	OCL 电路	76
第三节	OTL 电路	79
第四节	集成功率放大电路	81
第五节	实验 集成功率放大电路	82
思考题	.....	83
习题六	.....	83
第七章	直流电源	85
第一节	整流滤波电路	85
第二节	稳压电路	90
第三节	实验 单相整流滤波集成稳压电源	96
第四节	可控整流电路	97
第五节	实验 单相可控整流电路	104
思考题	.....	105
习题七	.....	106
第八章	数字电路基础	108
第一节	二进制数与 BCD 码	108
第二节	基本逻辑关系	109
第三节	逻辑代数的运算规则	113
第四节	逻辑函数的化简	114
思考题	.....	120
习题八	.....	120
第九章	集成逻辑门和组合逻辑电路	123
第一节	集成 TTL “与非” 门	123
第二节	CMOS 集成逻辑门电路	128
第三节	组合逻辑电路	135
第四节	实验 逻辑功能测试	154
第五节	实验 组合逻辑电路 (智力竞赛抢答器)	158
思考题	.....	159
习题九	.....	159
第十章	触发器和时序逻辑电路	162
第一节	触发器	162

第二节 实验 集成触发器逻辑功能的测试	170
第三节 寄存器	171
第四节 计数器	174
第五节 实验 计数器的测试	181
第六节 实验 计数译码显示电路	183
思考题	184
习题十	185
第十一章 脉冲信号的产生与整形	188
第一节 单稳态触发器	188
第二节 多谐振荡器	190
第三节 施密特触发器	191
第四节 555 定时器	193
第五节 实验 555 定时器的应用	197
思考题	197
习题十一	198
第十二章 数-模转换器和模-数转换器	200
第一节 数-模转换器	200
第二节 模-数转换器	203
第三节 实验 集成电路应用(数字电压表)	208
思考题	210
习题十二	210
附录一 SR8 型双踪示波器简介	212
附录二 XFD-6 型低频信号发生器简介	214
附录三 DA-16 型晶体管毫伏表	215

第一章 常用分立半导体器件

本章要求：在了解本征半导体、空穴、本征激发及掺杂半导体基础上，理解 PN 结的单向导电特性。熟悉二极管的伏安特性和稳压管的稳压机理。通过晶体管的输入、输出特性，熟练掌握晶体管截止、放大、饱和三种工作状态，特别是放大作用。熟悉半导体二极管和晶体管的主要参数。

第一节 半导体的基本知识

一、半导体及其导电特性

最常见的半导体是硅和锗，硅和锗最外层的电子数都是四个，所以又称它们为四价元素。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，它之所以能被广泛应用是因为它具有一些独特的性能。

特性 1 在纯净的半导体中掺入微量的五价元素或三价元素，半导体的导电能力将显著增强。

特性 2 半导体受热和光照时，导电能力将发生显著变化。

半导体具有这些特性的原因是半导体有特殊的结构及导电性能。

二、本征半导体

完全纯净、结构完整的半导体称为本征半导体。硅和锗晶体的共价键结构如图 1-1 所示。图中 +4 表示原子中原子核和内层电子的电荷，共价键内的两个电子是由相邻原子各用一个价电子组成。在无外界激发时，硅和锗晶体中没有自由电子存在，这时它相当于绝缘体。在受外界激发时，如常温下，共价键内的少数电子获得足够能量，挣脱共价键的束缚成为自由电子，这种现象称为本征激发或热激发。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，在原来的共价键内留下一个空位，这个空位叫做空穴。如图 1-2 所示。可见，在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现，即自由电子数等于空穴数。

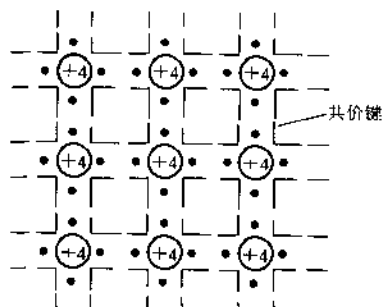


图 1-1 硅和锗晶体共价键结构

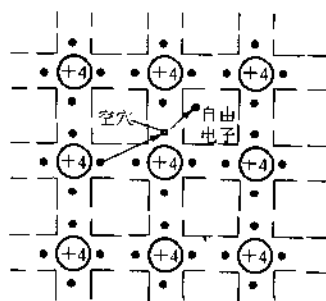


图 1-2 本征激发产生电子和空穴

在电场作用下可以运动的带电粒子叫做载流子。半导体中的载流子是带负电的自由电子和带正电的空穴。一个物体导电能力的强弱决定于载流子数目的多少。常温下，本征半导体中的载流子很少，所以它的导电能力极差。但由于本征激发的原因，本征半导体的导电能力又将随温度的升高而增强。温度是影响半导体性能的一个很重要的外部因素。

三、掺杂半导体

在本征半导体中掺入微量的五价或三价元素形成的半导体称为掺杂半导体。掺杂半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量五价元素形成的半导体叫做 N 型半导体。例如在单晶硅中掺入五价的磷元素，磷原子以四个价电子与相邻的硅原子组成四对共价键后，还多余一个价电子，这个多余的价电子不受共价键的束缚，稍获能量就能挣脱磷原子的吸引而成为自由电子，失去这一个价电子的磷原子就成为带正电的离子。同本征激发不同的是，产生这个自由电子的同时并不产生新的空穴。因此在 N 型半导体中，自由电子为多数载流子，空穴为少数载流子。由于其导电以自由电子为主，故亦称为电子型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入微量三价元素形成的半导体叫做 P 型半导体。例如在单晶硅中掺入三价的硼元素，硼原子以三个价电子与相邻的硅原子组成四对共价键，因缺少一个价电子而出现一个空位，这个空位极易由相邻共价键上的电子来填补，从而产生一个空穴，接受价电子填补的硼原子就成为带负电的离子。产生空穴的同时并不产生新的自由电子，因此在 P 型半导体中，空穴为多数载流子，自由电子为少数载流子。由于其导电以空穴为主，故亦称为空穴型半导体。

如果掺入百万分之一的杂质，则载流子浓度将增加一百万倍。可见，半导体的导电能力因掺杂而大大增强。

最后，应当指出，尽管 N 区的正离子和 P 区的负离子都是带电的，但他们是以参杂原子为整体的，不能向载流子那样任意移动。

第二节 PN 结的单向导电特性

一、PN 结的形成

将 N 型半导体和 P 型半导体结合在一起，在它们的交界面处，由于存在载流子的浓度差而引起多数载流子的扩散运动，即 N 区的电子向 P 区运动，P 区的空穴向 N 区运动，如图 1-3 (a) 所示，图中 (+)、(-) 分别表示正、负离子。载流子扩散运动使 N 区失去电子留下带正电的杂质离子，P 区失去空穴留下带负电的杂质离子，这些正负离子在交界面处形成一个很薄的空间电荷区，并在其中建立起一个由 N 区指向 P 区的内电场，如图 1-3 (b) 所示。显然，内电场的方向阻止了多数载流子的扩散，推动了少数载流子的漂移运动，即 N 区的空穴向 P 区运动，P 区的电子向 N 区运动。当少数载流子的漂移运动和多数载流子的扩散运动相等时，空间电荷区不再变化，这个宽度稳定的空间电荷区就是 PN 结。

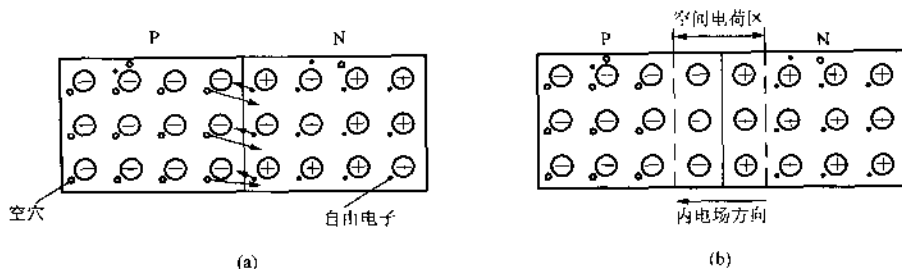


图 1-3 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动; (b) PN 结及内电场

二、PN 结的单向导电特性

当外加不同极性的电压时, PN 结将显现出单向导电特性, 这是 PN 结的基本特性。

1. 外加正向电压

PN 结的 P 区接电源正极, N 区接电源负极, 称为外加正向电压或正向偏置, 如图 1-4 (a) 所示。PN 结正偏时, 外加电场与内电场方向相反, 使空间电荷区变窄, PN 结呈现很小的电阻, 多数载流子的扩散运动形成一个很大的正向电流, PN 结正向导通。

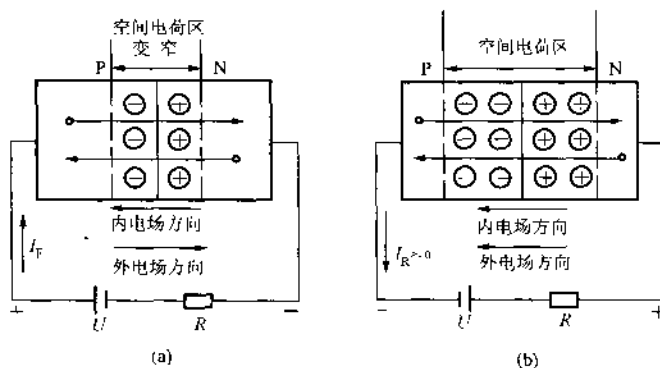


图 1-4 PN 结的单向导电性

(a) 正向偏置; (b) 反向偏置

2. PN 结外加反向电压

PN 结的 P 区接电源负极, N 区接电源正极, 称为外加反向电压或反向偏置, 如图 1-4 (b) 所示。PN 结反偏时, 外加电场与内电场的方向相同, 使空间电荷区变宽, PN 结呈现很大的电阻, 少数载流子的漂移运动形成一个很小的反向饱和电流, PN 结反向截止。

综上所述, PN 结正偏时导通, 反偏时截止, 即 PN 结具有单向导电特性。

第三节 半导体二极管

一、二极管的结构

从 PN 结的两端引出两个电极并用一个管壳将其封装便构成半导体二极管。如图 1-5

(a) 所示。二极管的核心部分是一个 PN 结，它具有 PN 结的单向导电特性。接 P 区的电极叫阳极，接 N 区的电极叫阴极。它的符号如图 1-5 (b) 所示。

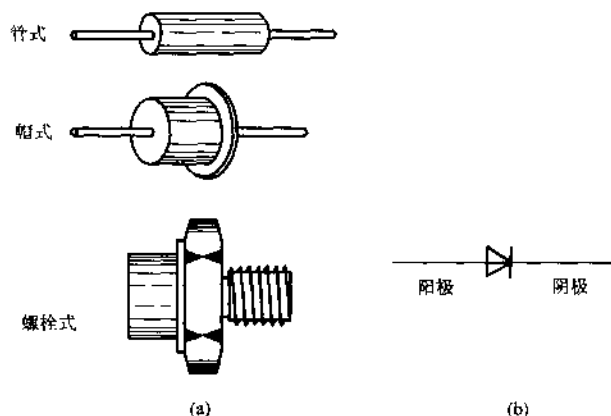


图 1-5 半导体二极管

(a) 常用二极管的外形图；(b) 二极管的符号

二极管按材料不同可分为硅二极管和锗二极管。由于硅材料的工作温度高，温度稳定性好，反向电流小，几乎大功率整流管都是硅二极管。锗二极管的工作频率较高，一般用于高频整流与检波。

按结构不同二极管可分为点接触型和面接触型两种。点接触型二极管适用于高频检波和开关电路。面接触型二极管适用于低频电路。

按用途不同又可将二极管分为普通二极管、整流二极管、稳压二极管、开关二极管等。普通二极管主要用于高频检波、鉴频、限幅等；整流二极管用于大、小功率的整流；稳压二极管用于各种稳压电路；而开关二极管则作为脉冲数字电路的开关元件。

二、二极管的伏安特性

二极管电流随外加偏置电压变化的曲线称为二极管的伏安特性。二极管的伏安特性如图 1-6 所示。

在正向特性区，当电压较低时，外电场不足以克服内电场的作用，电流几乎为零，二极管尚未导通。当电压超过某一值后，电流才显著增加，这个电压称为门限电压，硅管约为 0.5V，锗管约为 0.1V。在正常使用条件下，二极管的正向电流变化范围较大，二极管两端电压的变化却很小。硅管的导通电压约为 0.7V，锗管约为 0.3V。

二极管加反向电压时，PN 结处于反向偏置状态，有利于少数载流子的漂移而形成反向电流。由于少数载流子的浓度很小，所以反向电流很弱，一般只有微量级，加之少数载流子是由本征激发产生的，只与温度有关。当反向电压小于反向击穿电压时，反向电流几乎不随反向电压变化，呈现恒流特性，这时反向电流称为反向饱和电流。当反向电压等于或超过反向击穿电压后，反向电流会急剧增加，这种现象称为反向击穿。击穿后若降低二极管两端的电压，管子仍具有单向导电特性，这种击穿称为电击穿。电击穿后，如反向电流和反向电压的乘积超过容许的耗散功率，就会出现热击穿。热击穿是破坏性的，在使

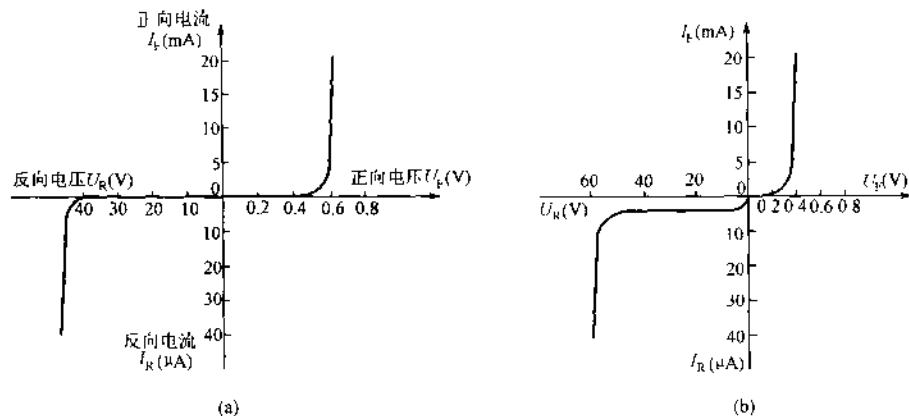


图 1-6 半导体二极管的伏安特性曲线

(a) 硅二极管的伏安特性; (b) 锗二极管的伏安特性

用中应避免。击穿时, 电流迅速增大的原因有两种: 一是很强的外电场直接把价电子从共价键中拉出来, 使其成为载流子, 这叫齐纳击穿; 另一种是强电场使 PN 结中的少数载流子获得了足够的动能, 在漂移过程中不断撞击其他原子, 使这些原子分离出载流子, 新产生的载流子不断加入碰撞队伍, 从而使少数载流子犹如雪崩似地成倍增加, 这叫雪崩击穿。

【例 1-1】 电路如图 1-7 所示。已知 $U = 5\text{V}$, $R = 1\text{k}\Omega$ 二极管正向压降为 0.7V 。试求:

(1) 当开关 S_1 、 S_3 闭合, S_2 、 S_4 打开时, 通过二极管的电流及二极管两端的电压。

(2) 当开关 S_2 、 S_4 闭合, S_1 、 S_3 打开时, 通过二极管的电流及二极管两端的电压。

解 (1) 当开关 S_1 、 S_3 闭合, S_2 、 S_4 打开时, 二极管正向导通, 通过二极管的电流为

$$I \approx \frac{U}{R} = \frac{5}{1} = 5\text{mA}$$

二极管承受的正向压降为 0.7V 。

(2) 当开关 S_2 、 S_4 闭合, S_1 、 S_3 打开时, 二极管反向截止, 通过二极管的电流 $I \approx 0$, 二极管承受的反向电压为 5V 。

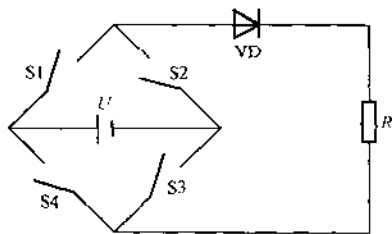


图 1-7 例 1-1 电路

【例 1-2】 二极管电路如图 1-8 (a) 所示。已知输入信号为 $u_i = 5\sin\omega t$ (V), 直流电源电压 U_C 为 3V 。试画出输出电压 u_o 的波形。设二极管为理想元件。

解 输入电压 u_i 和 U_C 的波形如图 1-8 (b) 所示。从图中看到, $0 \sim t_1$ 时刻间, $u_i > U_C$, 二极管正向导通, $u_o = U_C$; $t_1 \sim t_2$ 时刻间, $u_i < U_C$, 二极管反向截止, $u_o = u_i$; t_2 至一个周期结束, 二极管导通, $u_o = U_C$ 。输出波形 u_o 如图 1-8 (b) 中阴影部分所示。

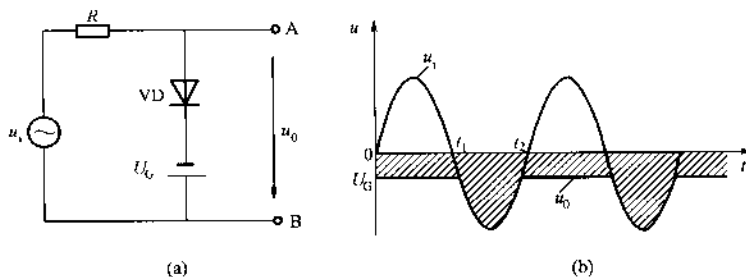


图 1-8 例 1-2 电路
(a) 电路图; (b) 波形图

三、二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_F

指二极管用于整流时, 根据允许温升折算出的平均电流值。实际使用时, 通过二极管的正向平均电流不得超过该值, 否则管子会因过热而损坏。

2. 反向电流 I_R

指二极管未击穿时的反向电流。该值愈小说明管子的单向导电性愈好, 而值的大小与半导体材料和温度有关。

3. 最大反向工作电压 U_{RM}

指为避免击穿所能加的最大反向电压。为保证管子安全工作, 手册中的最大反向工作电压 U_{RM} 是反向击穿电压 U_{BR} 值的一半。

4. 直流电阻 R_D

指二极管两端的直流电压 U_D 与流过二极管直流电流 I_D 的比值, 即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-1)$$

如图 1-9 所示。可见, R_D 与工作点 Q 有关。 Q 点越高, 正向 R_D 越小。一般正向 R_D 约为几十欧到几百欧, 反向 R_D 达几百千欧。用万用表所测电阻就是二极管的直流电阻。

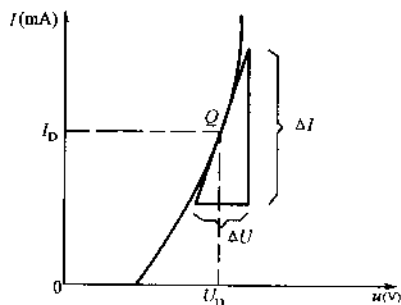


图 1-9 二极管的直流电阻和交流电阻

5. 交流电阻 r_D

交流电阻 r_D 是指工作点 Q 附近, 电压变化量 ΔU 与相应的电流变化量 ΔI 的比值, 即

$$r_D = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (1-2)$$

如图 1-9 所示。 r_D 的值随工作点电流的增大而减小, 通常正向 r_D 为几欧到几十欧。二极管的参数是选择二极管的依据, 在选择时应从实际需要出发。例如

要求反向电流小时应选硅管; 反向电压高时选硅管; 正向压降较低时选锗管。

四、稳压管

稳压管是一种具有稳压作用的二极管，它是利用 PN 结反向击穿后所表现出的稳压特性而制成。稳压管的符号和伏安特性如图 1-10 所示。反向击穿特性表现出的稳压作用在于，电流变化从 I_{Zmin} 至 I_{ZM} 时电压变化 ΔU 很小。由于稳压管工作在反向击穿状态，所以，稳压时应反向接入电路。

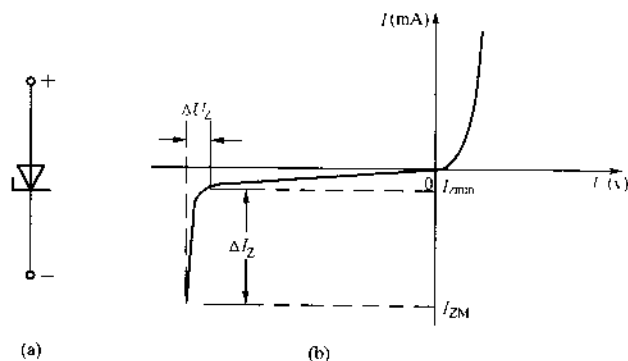


图 1-10 稳压管

(a) 图形符号；(b) 伏安特性曲线

稳压管的主要参数有：

1. 稳定电压 U_Z

U_Z 指稳压管工作时管子两端的工作电压。实际上是反向击穿电压。由于同一型号的稳压管 U_Z 不一定相同，所以手册中给出的 U_Z 是某一个范围。

2. 动态电阻 r_Z

r_Z 指管子两端电压变化量与相应电流变化量之比。即

$$r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z \quad (1-3)$$

它表示稳压性能， r_Z 愈小，管子的稳压性能愈好。工作电流愈大， r_Z 愈小。

3. 稳定电流 I_Z

I_Z 指稳压管工作时维持稳定电压的工作电流。工作电流小于 I_Z 时，稳压效果变差。

4. 最大耗散功率 P_{ZM}

P_{ZM} 是最大工作电流 I_{ZM} 同与之对应的稳定电压 U_Z 的乘积，即 $P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$ 。

第四节 晶 体 管

一、晶体管的结构

晶体管由两个 PN 结组成。它有三个掺杂区和由三个掺杂区引出的三个电极。如图 1-11 (a) 所示。中间的半导体叫基区，由此引出的电极叫基极 B。基区很薄且掺杂浓度低。两侧同类型的半导体分别叫发射区和集电区，相应于各区引出的电极分别叫发射极 E

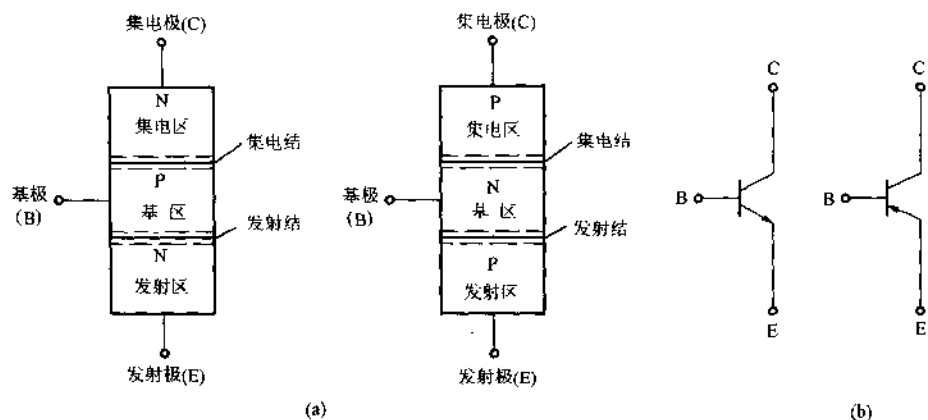


图 1-11 晶体管的结构示意图和符号

(a) 结构示意图; (b) 图形符号

和集电极 C。发射区的掺杂浓度远大于集电区的掺杂浓度。发射区和基区之间的 PN 结称为发射结，集电区和基区之间的 PN 结称为集电结。集电结的面积远大于发射结。基区为 P 型半导体的晶体管称为 NPN 型晶体管，基区为 N 型半导体的晶体管称为 PNP 型晶体管。

晶体管的符号如图 1-11 (b) 所示。符号中带箭头的电极是发射极，箭头方向表示发射结正向偏置时的电流方向。箭头方向指向发射结的为 PNP 型晶体管，背向发射结的为 NPN 型晶体管。

晶体管的种类很多，按材料分有硅管和锗管；按结构分有 PNP 型和 NPN 型；按功率分有小、中、大功率管；按频率分有高频管和低频管等。

二、晶体管的特性曲线

晶体管的特性曲线全面描述了各电极电流和电压之间的关系，是晶体管内部载流子运

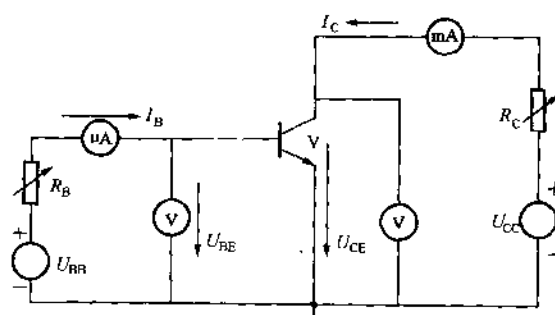


图 1-12 晶体管共发射极特性曲线测试电路

动的外部表现。特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线。实际使用时，特性曲线可用晶体管特性图示仪直接显示，也可利用手册中给出的典型特性曲线作参考。现就图 1-12 所示共发射极电路的特性曲线讨论如下。

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指集电极与发射极之间的电压 U_{CE} 为某一定值时，基极与发射极之间的电压 U_{BE} 和基极电流 I_B 之

间的关系曲线。如图 1-13 所示。从图中看到，输入特性曲线具有如下特征：

- (1) $U_{CE} = 0$ 时的输入特性曲线和二极管的正向特性曲线相似；

(2) U_{CE} 从 0V 增到 1V 时, 输入特性曲线右移;

(3) U_{CE} 继续增至 10V 时, 输入特性曲线右移很少。

因此, 在工程上, 输入特性曲线常用 $U_{CE} = 1V$ 时的曲线表示。

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指基极电流 I_B 为某一定值时, 集电极与发射极之间的电压 U_{CE} 和集电极电流 I_C 之间的关系曲线。如图 1-14 所示。输出特性曲线可划分为三个区域, 它们分别对应晶体管的三种工作状态, 即: 放大状态、截止状态和饱和状态。

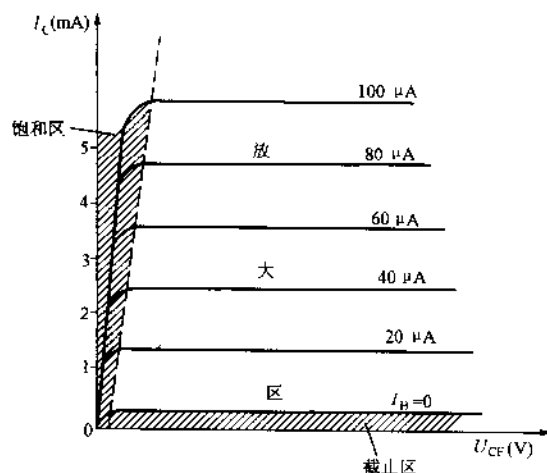


图 1-14 输出特性曲线

晶体管工作于放大区时, 对于 NPN 管, 三个电极的电位分布是 $U_C > U_B > U_E$, 三个电极电流分布如图 1-15 所示。将晶体管视为一广义节点, 根据基尔霍夫电流定律

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-4)$$

因为

$$I_C = \beta I_B \quad (1-5)$$

所以

$$I_E = (1 + \beta) I_B \quad (1-6)$$

(2) 截止区。晶体管工作在截止区的条件是: 发射结反向偏置, 集电结反向偏置。在特性曲线上即为 $I_B = 0$ 曲线以下的区域。在图 1-16 (a) 中, 当开关断开时, 通过开关的电流 $I_S = 0$, 开关两端的电压 $U_S = U$ 。在图 1-16 (b) 中, 当 $I_B = 0$ 时, 晶体管截止, $I_C \approx 0$, $U_{CE} \approx U_{CC}$ 。可见, 晶体管工作在截止状态相当于开关断开。

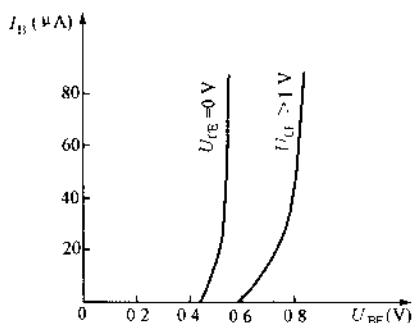


图 1-13 输入特性曲线图

(1) 放大区。晶体管工作在放大区的条件是: 发射结正向偏置, 集电结反向偏置。在特性曲线上即为 $I_B > 0$ 和 $U_{CE} > 0.5V$ 的区域。在放大区, 当 I_B 为一定值时, U_{CE} 增大, I_C 基本不变, 说明 I_C 与 U_{CE} 的变化基本无关。当 U_{CE} 为一定值时, I_C 随 I_B 成比例增加, 这个比例系数称为电流放大系数, 用 β 表示, 即 $I_C = \beta I_B$ 。可见 I_C 受 I_B 的控制。利用控制较小的基极电流 I_B , 实现对较大的集电极电流 I_C 的控制, 这就是晶体管的电流放大作用。

晶体管工作于放大区时, 对于 NPN

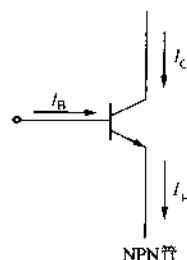


图 1-15 晶体管的电流分布图

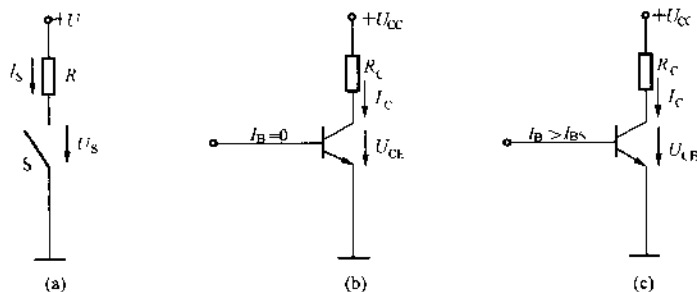


图 1-16 晶体管的开关特性

(a) 开关电路; (b) 晶体管的截止状态; (c) 晶体管的饱和状态

(3) 饱和区。晶体管工作在饱和区的条件是：发射结正向偏置，集电结正向偏置。在特性曲线上即为 $U_{CE} < 0.5V$ 的区域。在饱和区，基极电流 I_B 增大，集电极电流 I_C 基本不变，说明 I_C 不受 I_B 的控制，晶体管失去放大能力，这时的 U_{CE} 称为饱和压降，用 U_{CES} 表示。当 $U_{CE} = U_{BE}$ 时，晶体管处于临界饱和，临界饱和集电极电流为

$$I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad (1-7)$$

则临界饱和基极电流为

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{\beta R_C} \quad (1-8)$$

当工作时的基极电流 $I_B > I_{BS}$ 时，晶体管处于饱和状态。

在图 1-16 (a) 中，当开关闭合时，通过开关的电流 $I_s = U/R$ ，开关两端的电压 $U_s = 0$ 。在图 1-16 (c) 中，当 $I_B > I_{BS}$ 时，晶体管饱和， $I_{CS} \approx U_{CC}/R_C$ ， $U_{CE} \approx 0$ 。显然，晶体管工作在饱和状态相当于开关闭合。

在模拟电子电路中，晶体管主要作为放大元件而工作在放大状态。在数字电子电路中，晶体管主要作为开关元件而工作在饱和状态或截止状态。

【例 1-3】 试分析图 1-17 (a)、(b)、(c) 各电路中晶体管的工作状态。

解 图 1-17 (a) 中，基极通过 R_B 接地，与发射极等电位，发射结零偏置， $I_B = 0$ 、 $I_C = 0$ ，晶体管工作在截止状态。

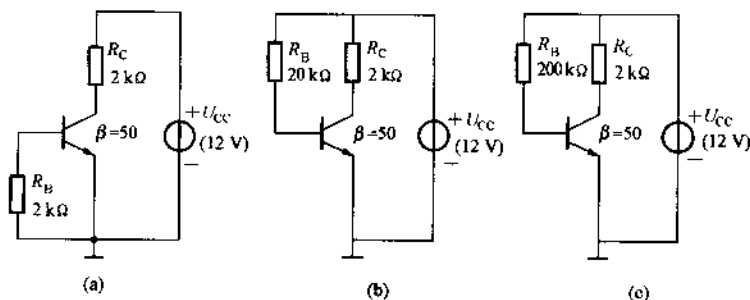


图 1-17 例 1-3 电路