



全国各类成人高等学校专升本考试用书(非统考课程)

专升本入学考试复习教材

电子技术基础

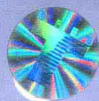
含解题指导

DIAN ZI JI SHU JI CHU

HAN JIE TI ZHI DAO

全国各类成人高校(专升本)入学考试复习教材编委会 组编

王保均 编著



中国人事出版社

全国各类成人高等学校专升本考试用书(非统考课程)

全国各类成人高校专升本入学考试复习教材
(非师范类)

电子技术基础

【含解题指导】

全国各类成人高校专升本入学考试复习教材编委会 组编

王保均 编著

中国人事出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础(非师范类)含解题指导/王保均编著. —北京:中国人事出版社,2000.11

全国各类成人高等学校(专升本)入学考试复习教材

ISBN 7—80139—606—5

I. 电… II. 王… III. 电子技术—成人教育:高等教育—入学考试—解题 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76725 号

中国人事出版社出版

100101 北京朝阳区育慧里 5 号

新华书店经销

北京仰山印刷厂印刷

*

1999 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月第 2 次印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:16.5

字数:400 千字 印数:5001—10000 册

定价:23.00 元

版权所有,翻印必究。本书封面贴有防伪标签,无标签者不得销售。

(如有缺页和倒装,本社负责退换)

前 言

2000年6月,教育部重新制定并颁布了2001年各类成人高等学校招生考试(专科起点升本科)科目设置方案。将专升本统一考试科目调整为八门课程,即政治、大学语文、英语、高等数学(一)、高等数学(二)、民法、教育理论、艺术概论。其它科目则调整为非统考课程。

本书自1998年出版以来,深得读者好评,1999年重印之际又重新进行了研读和审校,进一步提高质量。由于其独具的特点和风格,深得全国各地广大师生的好评和认可,各地教委、学校和辅导班纷纷将本书作为指定教材或首推教材,成为最畅销的专升本考试复习教材之一。

按照新的科目设置方案,本书为非统考科目。考虑到电子技术基础师生的教学需要,我们仍然重版了该书。

本书有如下特点:

1. 本书的编写注重对考生基础知识的把握及分析、解决问题的实际能力的要求,充分考虑成人高等教育的特点。紧扣电子技术基础(非师范类)复习考试大纲(原统一命题考试大纲)。因此,它可以作为一本复习考试可信赖的教科书。

2. 在本书的每一章节中,作者既有对知识要点的讲解、举例,又有有关应试技巧的介绍,还设计编写了练习并附有答案。这样,学习者在学习之后马上就可以通过做练习来检验自己掌握所学知识的情况。这本书的可操作性强。

3. 书后附有二套模拟试卷和近年来专升本考试电子技术基础复习考试大纲。

本书既可以作为专升本考试——电子技术基础(非师范类)的教材,由教师对考生进行辅导,也可以作为考生自学的教材。

本书由王保均编著。作者参加了多年的专升本考前辅导工作,具有一定的教学、命题及考前辅导的经验。

由于编写时间较短,不当之处望请专家及广大读者提出宝贵意见,待再版时进一步修改完善。

编 者

2000年11月

目 录

第一章 半导体器件基础.....	(1)
1.1 半导体的基础知识	(1)
1.2 PN 结和半导体二极管	(3)
1.3 半导体三极管	(9)
1.4 场效应管.....	(15)
思考与练习	(24)
参考答案	(28)
第二章 放大电路基础	(31)
2.1 放大的概念和放大电路的性能指标.....	(31)
2.2 单管共射基本放大电路.....	(33)
2.3 放大电路的分析方法.....	(36)
2.4 放大电路工作点的稳定.....	(48)
2.5 晶体管单管放大电路的三种接法.....	(52)
2.6 场效应管放大电路.....	(55)
2.7 多级放大器.....	(60)
2.8 放大电路的频率特性.....	(63)
思考与练习	(75)
参考答案	(84)
第三章 功率放大电路	(90)
3.1 功率放大器的特点及三种工作方式.....	(90)
3.2 互补对称功率放大电路.....	(91)
思考与练习	(100)
参考答案.....	(103)
第四章 集成运算放大电路.....	(105)
4.1 集成电路特点	(105)
4.2 集成运算放大器组成	(105)
4.3 集成运放电路举例及主要参数	(116)
思考与练习.....	(118)
参考答案.....	(121)
第五章 反馈放大电路.....	(123)
5.1 反馈的基本概念	(123)
5.2 负反馈放大电路的组态	(127)
5.3 反馈的表示方法	(129)
5.4 负反馈对放大器性能的影响	(131)
5.5 深度负反馈放大电路的计算	(135)

5.6 负反馈放大电路的自激振荡	(137)
思考与练习	(139)
参考答案	(144)
第六章 集成运算放大器的应用	(146)
6.1 理想运算放大器及其分析依据	(146)
6.2 基本运算电路	(147)
6.3 集成运放在信号处理方面的应用	(155)
6.4 集成运放在波形发生方面的应用	(170)
思考与练习	(175)
参考答案	(183)
第七章 正弦波振荡电路	(192)
7.1 正弦波振荡器的基本概念	(192)
7.2 RC 正弦波振荡电路	(193)
7.3 LC 正弦波振荡电路	(197)
7.4 石英晶体正弦波振荡电路	(200)
思考与练习	(204)
参考答案	(207)
第八章 直流电源	(209)
8.1 直流电源组成	(209)
8.2 整流电路	(209)
8.3 滤波电路	(212)
8.4 倍压整流电路	(214)
8.5 稳压电路	(215)
思考与练习	(222)
参考答案	(227)
模拟试题 (一)	(230)
模拟试题 (一) 参考答案及评分标准	(235)
模拟试题 (二)	(239)
模拟试题 (二) 参考答案及评分标准	(244)
专升本 (电子技术基础) 复习考试大纲	(247)

第一章 半导体器件基础

教学基本要求

了解常用半导体器件的工作原理，熟悉它们的外部特性及主要参数。

1. 理解半导体中两种载流子——电子和空穴的物理意义。
2. 理解 N 型半导体和 P 型半导体的物理意义。
3. 熟练掌握 PN 结的单向导电性，理解 PN 结的伏安特性方程 $I = I_s (e^{U/U_T} - 1)$ 的物理意义，了解 PN 结的电容效应。
4. 理解半导体二极管、稳压管的外特性及主要参数，了解选管原则。
5. 理解晶体三极管处于放大状态下电流分配关系及其放大条件，理解三极管共射特性曲线（包括输出特性曲线的三个区域：截止区、放大区、饱和区）和主要参数，了解选择三极管的原则。
6. 理解场效应管的工作特点、外特性及主要参数，了解其一般使用注意事项及选管原则。

1.1 半导体的基础知识

一、本征半导体

1. 半导体的特点

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。例如，硅和锗就是半导体器件中最常用的两种半导体材料。

半导体具有独特的导电性能。例如，它对温度和光的反应特别灵敏，当温度升高（或光照）时，它的导电能力就会有显著的增加。特别是，如果在纯净的半导体中掺入微量的杂质后，它的导电能力可增加几十万乃至几百万倍。这些特性表明，半导体的导电能力在不同条件下有很大的差别。也就是说，半导体的导电能力可以人为地加以控制，这就为半导体的应用开辟了广阔的天地。

半导体的导电特性是由内部的物质结构决定的。

2. 本征半导体的共价键结构

纯净的结构完整的半导体称为本征半导体。

锗和硅都是四价元素，在原子结构中最外层轨道上有四个价电子。因为物质导电性能与价电子有关，为了突出价电子作用，常采用图 1-1 所示的简化原子结构模型。

⊕4 代表原子核和内层电子所具有的电荷。

在本征半导体硅和锗的晶体结构中，由于原子间距离很近，价电子不仅受自身原子核的束缚，而且还受到相邻原子核的吸引，使得一个价电子为相邻的原子核所共有，也就是，两个相邻原子共有一对价电子，它像键条一样将相邻的原子结合在一起，这种靠共有价电子对实现的结合，叫做共价键结构。如图 1-2 所示。

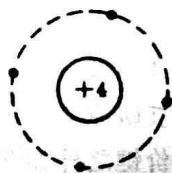


图 1-1 硅或锗的简化原子结构模型

3. 半导体中的载流子

物质的导电能力取决于载流子。载流子是指能够携带电荷并参与导电过程的粒子。

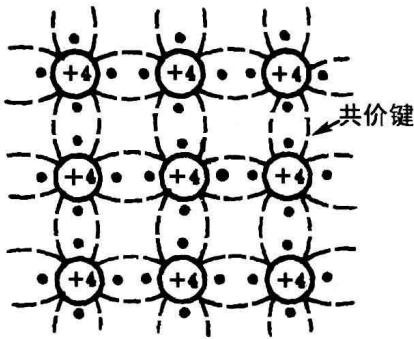


图 1-2 硅或锗晶体中共价键结构示意图

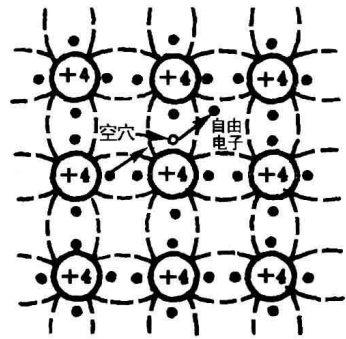


图 1-3 本征激发产生电子和空穴

在热力学零度时，价电子不能挣脱共价键束缚，晶体中无自由电子，半导体不导电。

在室温下，少数价电子获得足够热运动能量，挣脱共价键束缚，成为自由电子，在共价键中留下一个空位，这个空位叫做空穴，如图 1-3 所示。半导体在热（或光照）等作用下产生电子、空穴对的现象称为本征激发。

共价键中失去电子出现空穴时，原子的电中性被破坏，显出带正电。可以认为空穴带正电。这个空穴很容易被相邻原子的价电子填补，于是在相邻共价键中又出现一个空穴，也即相当于空穴移到相邻的某一位置上去了。这样，价电子依次填补下去，便形成了空穴的移动，它的运动方向与价电子运动方向相反，为了区别于自由电子的运动，把价电子的运动叫做空穴运动，认为空穴是一种带正电荷的载流子。

总之，在半导体中存在两种载流子：带正电荷的空穴和带负电荷的自由电子（简称电子）。在电场作用下，电子运动形成电子电流，空穴运动形成空穴电流，两种电流方向相同，它们的和即是半导体中的电流。

在本征半导体中，靠本征激发产生的电子和空穴总是相伴产生，成对出现的。同时又不断复合，在一定温度下，载流子的产生和复合达到动态平衡，于是半导体中的载流子便维持一定数目。

在室温下，本征半导体载流子数目很少，所以本征半导体的导电能力是很弱的。当温度升高时，本征载流子浓度随温度升高按指数关系增加，因此，温度是影响半导体导电性能的一个重要因素。

二、杂质半导体

本征半导体的导电能力很差，但如果在本征半导体中掺入微量的其他元素的原子，就会使半导体的导电能力大大提高。这些微量元素的原子称为杂质，常用杂质为三价和五价元素。掺入杂质后形成的半导体称为杂质半导体，有 *P* 型和 *N* 型两类。

1. *N* 型半导体

在硅（或锗）的单晶中掺入微量的五价元素磷，不改变硅的共价键结构，只是某些位置上的硅原子被磷原子替代。磷原子的五个价电子中，有四个与硅原子组成共价键，多余的一个价电子处在共价键之外如图 1-4 所示，不受共价键束缚，受到磷原子束缚力较弱，很容易挣脱磷原子核束缚成为自由电子，磷原子失去一个价电子变成正离子（称为电离）。室温时，几乎磷原子都电离，每一个磷原子都能提供一个自由电子和正离子。由于磷原子可以提供电子，故称为施主杂质。在掺有施主杂质的半导体中，电子的浓度远大于空穴的浓度，所以称电子为多数载流子（简称多

子), 空穴为少数载流子 (简称少子), 电子导电成为这种半导体的主要导电方式, 故称为 *N* 型半导体。*N* 型半导体的带电粒子分布如图 1-5 所示。 $\oplus$ 表示施主正离子, $\cdot$ 表示自由电子, $\circ$ 表示空穴。

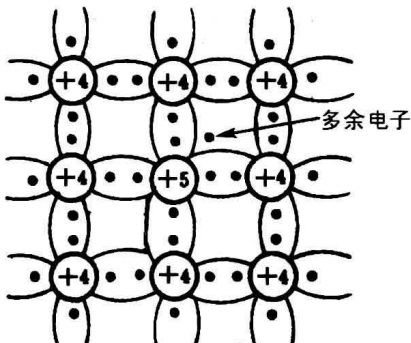


图 1-4 *N* 型半导体结构示意图

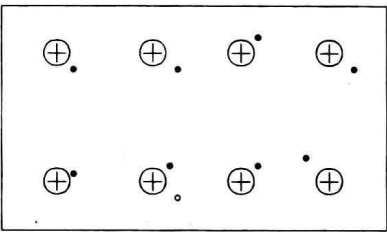


图1- 5 *N*型半导体带电粒子分布示意图

2. *P* 型半导体

在硅 (或锗) 的单晶中掺入微量的三价元素硼, 硼原子和周围的硅原子形成共价键时, 缺少一个价电子, 在共价键中出现一个空位, 这个空位很容易被相邻价电子填补, 使硼原子成为负离子 (电离), 而在失去价电子的共价键中出现一个空穴 (图 1-6)。室温时, 几乎硼原子都电离, 都可能提供一个空穴和负离子。由于硼原子在硅晶体中能接受电子, 故称为受主杂质。在这种掺有受主杂质的半导体中, 空穴是多子, 电子是少子, 主要靠空穴导电。称为 *P* 型半导体。带电粒子分布图如图 1-7 所示, 图中 $\ominus$ 表示受主负离子。

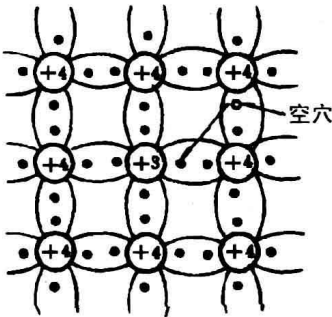


图 1-6 *P* 型半导体结构示意图

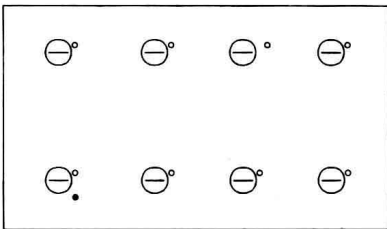


图1- 7 *P*型半导体带电粒子分布示意图

在杂质半导体中, 多数载流子主要是杂质电离形成, 由于杂质原子在室温时全部电离, 所以多子浓度, 基本上等于杂质原子浓度, 与温度无关。少子是本征激发产生, 虽然浓度很低, 但它对温度非常敏感, 将影响半导体器件的性能。

最后需要指出的是, 在杂质半导体中, 正负电荷数量相等, 呈现电中性。

1.2 *PN* 结和半导体二极管

一、*PN* 结

在一块完整的硅片上, 用不同的掺杂工艺使其一边形成 *N* 型半导体, 另一边形成 *P* 型半导体, 那么在两种半导体的交界面附近就形成了 *PN* 结。*PN* 结是构成各种半导体器件的基础。

1. PN 结形成

P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时, 由于界面两侧电子和空穴浓度差的存在, 便发生多数载流子电子和空穴的扩散运动。空穴由浓度高的 P 区向浓度低的 N 区扩散, 电子由浓度高的 N 区向浓度低的 P 区扩散。扩散的结果, 在界面附近 P 区一侧因失去空穴形成负离子的集聚, 在 N 区一侧因失去电子形成正离子的集聚, 它们集中在界面两侧形成一个很薄的空间电荷区, 这就是 PN 结。如图 1-8 所示。由于空间电荷区内没有载流子, 所以又称为耗尽层。

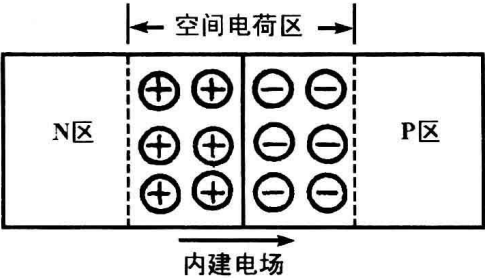


图 1-8 平衡状态下的 PN 结

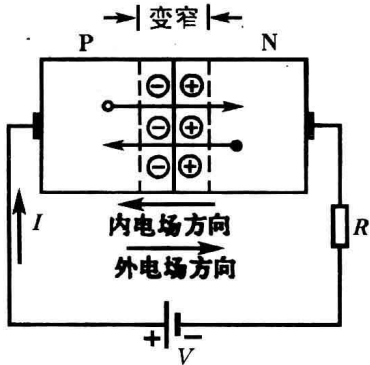


图 1-9 PN 结加正向电压

空间电荷区靠 N 区一侧带正电, 靠 P 区一侧带负电, 因此产生一个由 N 区指向 P 区的内建电场。这个内电场一方面阻止多子的扩散, 另一方面使 N 区的少子空穴向 P 区漂移, 使 P 区的少子电子向 N 区漂移, 漂移运动和扩散运动方向相反, 二者互相联系又互相矛盾。开始时, 扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中, 内电场逐步加强, 少子漂移运动也不断增强, 多子扩散运动逐渐减弱。最终, 扩散运动和漂移运动达到动态平衡。扩散过去多少电子和空穴, 便会有同等数量的电子和空穴漂移过来。于是, 空间电荷区的宽度基本上稳定下来, 扩散电流等于漂移电流, 通过 PN 结的电流为零。 PN 结处于相对稳定状态。

2. PN 结的单向导电性

上面讨论的是 PN 结在没有外加电压时的情况, 这时半导体中的扩散和漂移处于动态平衡, 通过 PN 结电流为零。如果在 PN 结上加外部电压, 必然会破坏扩散与漂移运动的动态平衡, 使通过 PN 结的电流不为零。

(1) PN 结加正向电压 (正向偏置, 简称正偏)

正向偏置即外电源的正端接 P 区, 负端接 N 区 (图 1-9)。这时外加电压在耗尽层中建立的外电场与内电场方向相反。从而削弱了空间电荷区所产生的内电场, 使空间电荷区变窄, 多子的扩散运动大于少子的漂移运动, 形成正向电流, 方向由 P 区指向 N 区。由于多子浓度较大, 当外加电压不太高时就可以形成很大的正向电流, 所以 PN 结的正向电阻较小。

(2) PN 结外加反向电压 (反向偏置, 简称反偏)

反向偏置即外电源的正端接 N 区, 负端接 P 区 (图 1-10)。使外电场与内电场方向一致, 从而加强了内电场, 使空间电荷区变宽, 少子漂移大于多子扩散运动, 形成反向电流, 方向由 N 区指向 P 区。由于少子的浓度很小, 即使它们全部漂移, 其反向电流还是

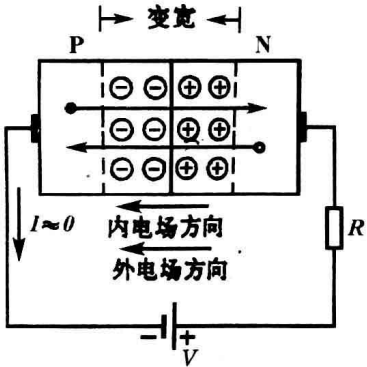


图 1-10 PN 结加反向电压

很小的，故 PN 结的反向电阻很大。

3. PN 结方程

根据理论分析， PN 结两端的电压 U 和流过 PN 结的电流 I 之间的关系为

$$I = I_s(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中 I_s 为反向饱和电流， $U_T = \frac{KT}{q}$ 称为温度电压当量，其中 K 为玻耳兹曼常数， T 为热力学温度， q 为电子的电量，在 $300K$ 时 $U_T \approx 26mV$ 。

由式 (1-1) 可知，正向偏置时，只要 U 大于 U_T 几倍以上，则有 $e^{\frac{U}{U_T}} \gg 1$ ，所以 $I \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}}$ ，即 I 随 U 按指数规律变化。反向偏置时，只要 $|U|$ 大于 U_T 几倍以上，则有 $e^{\frac{U}{U_T}} \ll 1$ ，所以 $I \approx -I_s$ 。式中负号表示为反向电流。反向电流由少子漂移形成，少子是本征激发产生的。在一定温度时，少子浓度不变，当外加电压超过零点几伏后，因少子供应有限，反向电流基本上不随外加电压增大而增加，故 I_s 称为反向饱和电流。温度升高时， I_s 迅速增大。

4. PN 结的击穿

在一定范围的反向电压作用下，流过 PN 结的电流是很小的反向饱和电流，但是当反向电压超过某一数值后，在空间电荷区中，使更多的价电子从共价键中出来，产生大量的电子、空穴对，使少子浓度大大增加，引起反向电流急剧增加，这种现象称为反向击穿。只要 PN 结不因电流过大产生过热而损坏，则击穿是可逆的。

5. PN 结电容

PN 结除单向导电性外，还具有一定的电容效应。在 PN 结中，有两个电荷的集聚区，一个是由带电离子形成的耗尽层，一个是 PN 结正偏时由 P 区空穴和 N 区电子扩散到对方区域形成的非平衡少子的集聚区。它们的电荷量随外加电压的变化而变化，与普通电容在外加电压作用下进行“充、放电”的过程相似，相当一个电容。分别叫做 PN 结的耗尽层电容和扩散电容。当工作频率比较高时，就要考虑结电容的作用。

二、半导体二极管

半导体二极管由一个 PN 结加上电极引线和管壳构成。表示符号如图 1-11 所示。

1. 二极管特性

由于二极管存在引线电阻、半导体体电阻及表面漏电流，使二极管伏安特性与 PN 结伏安特性略有区别。在一般情况下，二极管特性仍可用 PN 结方程式 (1-1) 描述。二极管伏安特性曲线如图 1-12 所示。可以看出，二极管伏安特性是非线性的，正反向导电性能有很大差别。

(1) 正向特性

正向特性起始部分的正向电流几乎为零，当正向电压超过某一值后，正向电流增长得很快，该电压值称为死区电压，其大小与材料及环境温度有关。通常，硅管的死区电压约为 $0.5V$ ，锗管约为 $0.1V$ 。正向导通且电流不大时，硅管的压降约为 $0.6V \sim 0.8V$ ，锗管的压降约为 $0.1V \sim 0.3V$ 。

(2) 反向特性

在反向电压作用下形成很小的反向饱和电流。小功率硅管的反向电流一般小于 $0.1\mu A$ ，而锗管通常为几十微安。

(3) 反向击穿

反向电压过大会产生反向击穿。二极管的反向击穿



图1-11
半导体二极管符号

电压一般在几十伏以上。

2. 二极管的主要参数

描写二极管特性的物理量,称为二极管的参数,它是反映二极管性能的质量指标。二极管的主要参数有下面几个。

(1) 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管长期使用时,允许流过二极管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。当电流超过允许值时,将由于 PN 结过热而损坏管子。

(2) 最大反向工作电压 U_R

它是指二极管在使用时所允许加的最大反向电压,超过此值二极管就有可能发生反向击穿。通常取反向击穿电压的一半作为 U_R 。

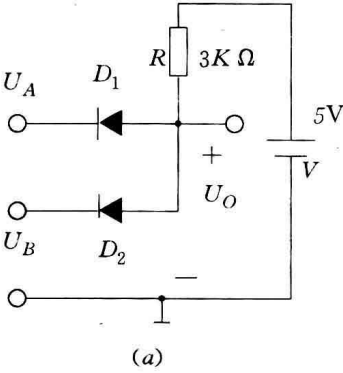
(3) 反向电流 I_R

指二极管未击穿时的反向电流值。 I_R 越小说明二极管的单向导电性越好。此值与温度有密切关系,高温运行时要注意。通常,硅管的反向电流在几个微安以下。锗管的反向电流为硅管的几十到几百倍。

(4) 最高工作频率 f_M

二极管的工作频率超过 f_M 值时,单向导电性将不能很好地体现。此值由 PN 结结电容大小决定。

[例 1-1] 分析图例 1-1 (a) 所示电路中二极管的工作状态,确定出 U_o 的值,并将结果填入图 (b) 的表中,设二极管的正向压降为 0.7V。



U_A (V)	U_B (V)	D_1	D_2	U_o (V)
0	0	导	导	0.7
0	3	导	截	0.7
3	0	截	导	0.7
3	3	导	导	3.7

(b)

图例 1-1

解: 当 $U_A=U_B$ 时, 两个二极管同时导通并钳位。若 $U_A=U_B=0V$ 时, $U_o=0.7V$; 若 $U_A=U_B=3V$ 时, $U_o=3.7V$

当 $U_A \neq U_B$ 时, 例如 $U_A=0V, U_B=3V$, 因 U_A 端电位比 U_B 端低, 所以 D_1 优先导通并钳位, 使 $U_o=0.7V$, 此时 D_2 因反偏而截止。同理, 当 $U_A=3V, U_B=0V$ 时, D_2 导通且钳位, $U_o=0.7V$, 此时 D_1 反偏截止。

[例 1-2] 在图例 1-2 所示的电路中, 设 $u_i=6\sin\omega t$ (V), 试画出 u_o 的波形。设二极管导通压降为 0.7V。

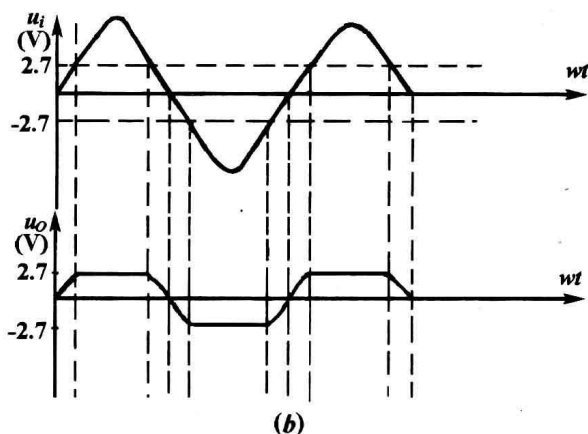
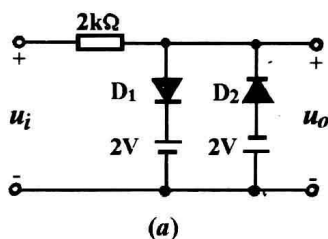
解: ①在 u_i 的正半周, D_2 截止。

$u_i < 2.7\text{V}$ 时, D_1 截止, $u_o = u_i$
 $u_i > 2.7\text{V}$ 时, D_1 导通钳位, $u_o = 2.7\text{V}$

②在 u_i 的负半周, D_1 截止.

$|u_i| < 2.7\text{V}$ 时, D_2 截止, $u_o = u_i$
 $|u_i| > 2.7\text{V}$ 时, D_2 导通钳位, $u_o = -2.7\text{V}$

则 u_o 的波形如图 1-2 (b) 所示



图例 1-2

三、稳压管

1. 稳压管的伏安特性

稳压管是一种特殊的面接触型半导体硅二极管。其表示符号及伏安特性如图 1-13 所示。由图 1-13 可知, 稳压管的正向特性曲线与普通二极管相似, 而反向击穿特性曲线比较陡。稳压管正是工作在特性曲线的反向击穿区域。从曲线上可以看出, 在击穿状态下, 流过管子的电流在一定范围内变化, 而管子两端电压变化很小, 利用这一点可以达到“稳压”的效果。稳压管与一般二极管不一样, 它的反向击穿是可逆的。但是, 如果反向电流超过允许值 I_{ZMAX} , 稳压管将会发生热击穿而损坏。由图 1-13 (b) 可知, 当稳压管的电流在 I_{Zmin} 与 I_{Zmax} 之间, 稳压性能好且击穿可逆。

2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压 U_Z

指稳压管中的电流为规定电流时, 稳压管两端的电压值。

(2) 稳定电流 I_Z

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。

(3) 动态电阻 r_Z

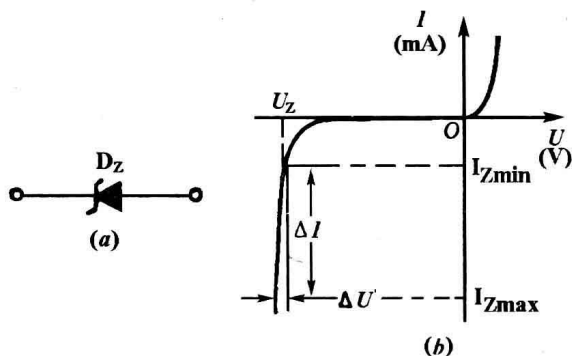


图 1-13 稳压管

(a) 符号

(b) 伏安特性曲线

是指稳压管上电压变化量与电流变化量之比, 即

$$r_z = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z} \quad (1-2)$$

r_z 越小, 稳压效果越好。一般在几欧到几十欧之间。

(4) 额定功耗 P_z

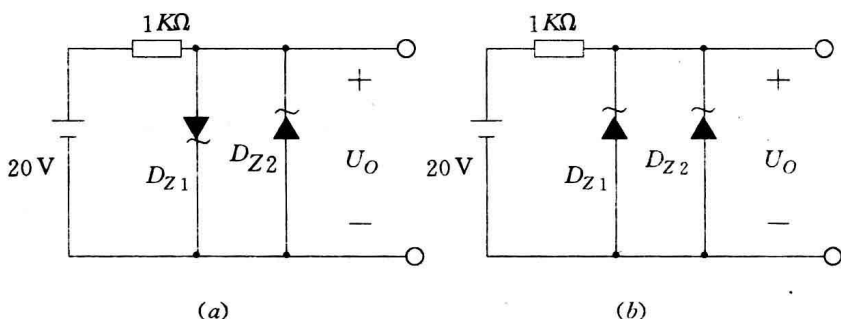
它是由管子允许温升所决定的参数。 $P_z = U_z I_{z\max}$ 。

(5) 温度系数 α

指温度每升高 1°C 时稳定电压值的相对变化量。 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 $4\text{V} \sim 7\text{V}$ 之间时, 温度系数很小。

[例 1-3] 电路如图例 1-3 所示, 已知稳压管的稳定电压 $U_{z1} = 6\text{V}$, $U_{z2} = 9\text{V}$, 稳压管的正向压降为 0.7V 。求各电路的输出电压 U_o 。

解: 图例 1-3 (a), D_{z1} 正向导通钳位, $U_o = 0.7\text{V}$, D_{z2} 截止。



图例 1-3

图例 1-3 (b), 因为 $U_{z1} < U_{z2}$, 所以 D_{z1} 反向击穿后, $U_o = 6\text{V}$, D_{z2} 截止。

[例 1-4] 稳压管稳压电路如图例 1-4 所示, 已知稳压管的稳压值为 6V , 稳定电流为 10mA , 额定功耗为 200mW 。限流电阻 $R = 500\Omega$ 。

(1) 当 $U_i = 20\text{V}$, $R_L = 1\text{K}\Omega$, $U_o = ?$

(2) 当 $U_i = 20\text{V}$, $R_L = 0.1\text{K}\Omega$, $U_o = ?$

解: (1) 当 $I_{z\min} \leq I_z < I_{z\max}$ 时, 稳压管击穿, $U_o = U_z$, 由图可知,

$$\begin{aligned} I_z &= I - I_o = \frac{U_i - U_o}{R} - \frac{U_o}{R_L} \\ &= \frac{20 - 6}{0.5} - \frac{6}{1} = 22\text{mA} \end{aligned}$$

$$I_{z\max} = \frac{P_z}{U_z} = \frac{200\text{mW}}{6\text{V}} \approx 33\text{mA}$$

故 $10\text{mA} < I_z < 33\text{mA}$

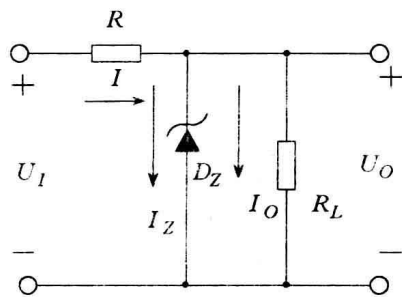
所以稳压管击穿 $U_o = U_z = 6\text{V}$

(2) 假设稳压管击穿, 则 $U_o = U_z = 6\text{V}$

$$I_z = I - I_o = \frac{20 - 6}{0.5} - \frac{6}{0.1} < 0$$

即小于 10mA , 故稳压管截止, 由图可得:

$$U_o = \frac{R_L}{R + R_L} U_i = \frac{0.1}{0.5 + 0.1} \times 20 \approx 3.3\text{V}$$



图例 1-4

1.3 半导体三极管

一、三极管的结构

三极管有 *NPN* 型和 *PNP* 型两种。其结构和表示符号如图 1-14 所示。

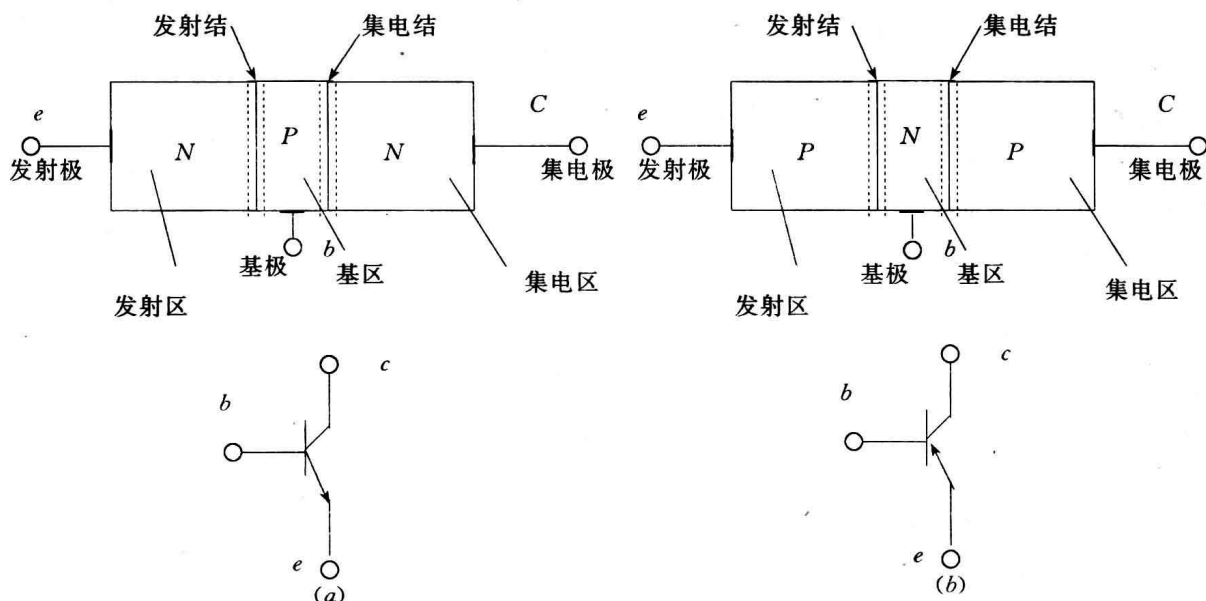


图1-14 晶体管结构示意图和符号

(a) *NPN* 型晶体管 (b) *PNP* 型晶体管

从图 1-14 (a) 和 (b) 可以看出，它有发射区、基区和集电区三个区，分别引出发射极 *e*、基极 *b* 和集电极 *c*，有两个 *PN* 结，基区和发射区之间的结称为发射结，基区和集电区之间的结称为集电结。表示符号中射极箭头的方向表示发射结正偏时实际电流的方向。

为了保证三极管具有电流放大作用，三极管制造工艺上的特点是：发射区是高浓度掺杂区，基区很薄且杂质浓度很低，集电结结面积大。

二、三极管的电流分配与放大作用

按图 1-15 接好线路，由于发射极为输入回路和输出回路的公共端，故称为共射电路。电源 V_{cc} 和 V_{BB} 的接法应使发射结正偏，集电结反偏。用毫安表测发射极电流 I_E 和集电极电流 I_C ，用微安表测基极电流 I_B 。测量结果如下：

① 各极电流的方向如图 1-15 所示。

$$② I_E = I_B + I_C$$

③ $\frac{I_C}{I_B}$ 及 $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$ 值分别为远大于 1 的常数。

下面用三极管内部载流子的运动过程来解释上述实验结果。

1. 三极管内部载流子的运动规律

载流子的内部运动过程如图 1-16 所示。

(1) 发射区向基区扩散电子

由于发射结正偏，多子的扩散运动加强，产生通过发射结的正向电流，它包括发射区的多子（自由电子）向基区扩

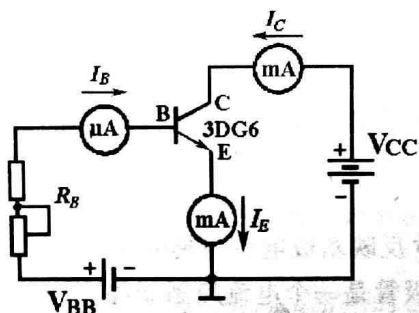


图 1-15 三极管各极电流测量

散形成的电子电流 I_{EN} 和基区的多子(空穴)向发射区扩散形成的空穴电流 I_{EP} , 由于基区空穴浓度远小于发射区自由电子浓度, 故空穴电流 I_{EP} 可以忽略不计。

发射区因扩散失去的自由电子由电源通过发射极给予补充, 于是便形成发射极电流 I_E , $I_E \approx I_{EN}$ 。

(2) 电子在基区的扩散和复合

扩散到基区的自由电子, 首先聚集在发射结附近, 由于浓度差使自由电子继续向集电区扩散。在扩散过程中, 一部分自由电子与基区的空穴相遇而复合消失, 另一部分自由电子继续向集电结方向扩散。由于基区很薄而且空穴浓度很低, 所以只有一小部分自由电子与空穴复合, 而绝大部分自由电子能扩散到集电结边缘。

基区中被复合掉的空穴, 由 V_{BB} 电源通过基极给予补充, 于是形成基极电流 I_{BN} 。

(3) 集电区收集电子

由于集电结反偏, 所以基区中扩散到集电结边缘的电子在电场的作用下很容易通过集电结被集电区收集, 形成集电极电流 I_{CN} 。

(4) 集电极的反向电流

由于集电结反偏, 原来集电区的少子(空穴)要向基区漂移, 基区的少子(电子)也要向集电区漂移, 形成反向饱和电流 I_{CBO} 。

综上所述, 三个电极上的电流分别为:

$$I_E = I_{EN} = I_{BN} + I_{CN} \tag{1-3}$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO} \tag{1-4}$$

$$I_B = I_{BN} - I_{CBO} \tag{1-5}$$

2. 电流分配关系

把式 (1-4) 和 (1-5) 相加, 利用式 (1-3) 可以得出

$$I_E = I_B + I_C \tag{1-6}$$

从图 1-16 知道, I_{CN} 代表从发射区注入到基区而扩散到集电区的电子流, I_{BN} 代表从发射区注入到基区被复合后形成的电子流。对一个特定的三极管, I_{CN} 与 I_{BN} 的比例关系是确定的。由于基区很薄掺杂浓度很低, 所以 $I_{CN} \gg I_{BN}$, 故 I_{CN} 与 I_{BN} 的比值是一个远大于 1 的常数, 这个常数称为共发射极直流电流放大系数, 用 β 表示。即

$$\beta = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \tag{1-7 (a)}$$

如果忽略 I_{CBO} , 则式 (1-7 (a)) 成为

$$\beta \approx \frac{I_C}{I_B} \tag{1-7 (b)}$$

β 反映基极电流与集电极电流之间的分配关系, 也就是基极电流对集电极电流的控制关系, 所以三极管是一个电流控制器件。(1-6) 和 (1-7 (b)) 两式表明三极管的发射极电流 I_E 近似按照 β 倍的比例分配为集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 两个部分, 因而三极管实质是一个电流分配器。

变换一下式 (1-7 (a)), 可以得到

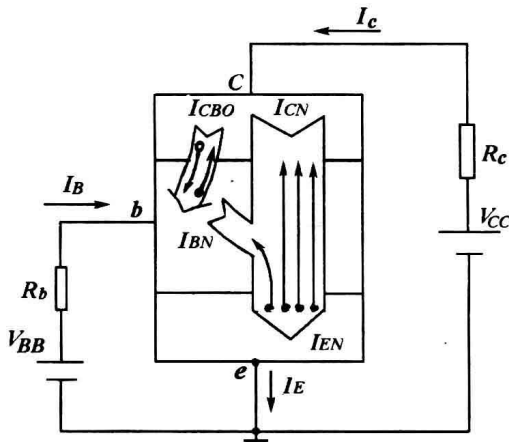


图 1-16 三极管内部载流子的运动和各级电流

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO} = \beta I_B + I_{CEO} \quad (1-8)$$

$$\text{其中 } I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$$

式 (1-8) 表示共发射极电路的电流传输关系。

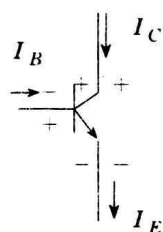
3. 三极管的电流放大作用

如果基极电源电压 V_{BB} 稍微增大, 则发射结上的电压 U_{BE} 增加一个 ΔU_{BE} , 由于发射结是正偏, 所以注入到基区的电子流也增加了一个增量 ΔI_E , 这个 ΔI_E 在基区的扩散过程中, 由于基区很薄掺杂浓度很低, 所以只有很小一部分在基区复合转换成基极电流增量 ΔI_B , 剩下绝大部分将扩散到集电区成为集电极电流增量 ΔI_C 。显然, ΔI_C 远大于 ΔI_B , 而且管子制成后, ΔI_C 与 ΔI_B 的分配比例不变, 即 ΔI_C 与 ΔI_B 比值应为远大于 1 的常数, 这个常数用 β 表示。称为共发射极交流电流放大系数。即

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

从载流子的运动过程不难看出, 基区很薄掺杂浓度很低, 是三极管能起到电流放大作用的内因; 而发射结正偏, 集电结反偏是三极管具有电流放大作用的外部条件。

[例 1-5] 标出工作在放大状态的 NPN 型和 PNP 型三极管中电流方向和各级极性



图例 1-5

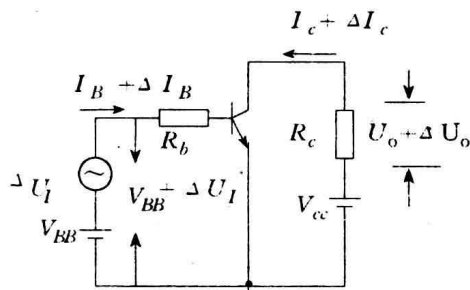
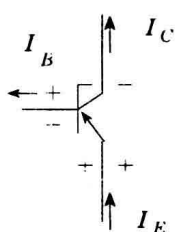


图1-17 共射放大电路

解: 三极管工作在放大状态时, 发射结正偏, 集电结反偏。故电流方向和电极极性如图例 1-5 所示。对 NPN 型管: $U_C > U_B > U_E$, 对 PNP 型管: $U_C < U_B < U_E$ 。则 NPN 与 PNP 管在组成放大电路时, 所加电源极性相反。

4. 晶体管的电压放大作用

电路如图 1-17 所示, 在输入回路中接一个信号电压 ΔU_I , R_c 两端电压作为输出电压。

加入 ΔU_I 后, 加在 R_b 和发射结上的电压变为 $V_{BE} + \Delta U_I$, 则基极电流为 $I_B + \Delta I_B$, 集电极电流为 $I_C + \Delta I_C$, R_c 上电压变为 $U_O + \Delta U_O$ 。由于发射结正偏, 即使 ΔU_I 很小, 也会引起很大的 ΔI_B 及 ΔI_C , 而集电结反偏, 它呈现很大的反向电阻, 即使 R_c 很大也仍能保证集电结反偏。这就是说, 虽然 ΔU_I 很小, 但在 R_c 上可以得到很大的输出电压 ΔU_O , 即 $\Delta U_O \gg \Delta U_I$, 实现了电压放大。

三、特性曲线

1. 三极管的连接方式

由图 1-15 已知, 发射极为输入回路和输出回路的公共端, 所以称为共射电路, 依此类推, 如果基极作为输入回路和输出回路的公共端, 则为共基电路。所谓共集电路就是输入回路和输出回路的公共端为集电极。在电路中常用共射电路。

三极管的特性曲线是用来表示该三极管各极电压和电流之间的相互关系的。最常用的是共射电路的输入特性曲线和输出特性曲线。这些特性曲线可用晶体管特性图示仪直观地显示出来。

2. 三极管的共射输入特性曲线