

高等学校教学参考书

模拟电子技术学习指导

唐延彩 常明兰 刘玉明 等 编著

机械工业出版社

前 言

“模拟电子技术”是一门理论性、实践性很强的技术基础课，是自动控制（自动化）、电气技术、应用电子技术等专业的主干课。由于内容多、概念强、对问题的分析往往采用近似法处理，这给初学者带来了很大的困难。而电子技术发展很快，课本越编越厚，但学时却越来越少。为了解决内容多、难度大、学时少这一矛盾，我们编写了“模拟电子技术学习指导”一书作为学习该课程的辅助教材。

本书在编写的过程中极力避免书本内容的搬家，书中内容也并非针对哪一种教材，从内容的编排上和例题的选择上均带有普遍性。基于此，本书内容并不紧贴教材，但也并不远离教材，在章节划分上根据需要有合有分，在内容编写方面根据工程需要适当拓宽。

本书每章基本内容一项是作者多年教学工作经验的总结，是课本有关内容较详细的归纳和提炼。在每章内容的叙述过程中，既着重于理论的严密性、系统性，又着重于知识的实用性，在打好放大电路基础的前提下，本书着重于集成运算放大器在线性电路和非线性电路中的应用。

本书每章最后有例题分析一项，全书共对282个例题进行了详细的解答，目的在于通过大量的、各种不同类型的例题来巩固概念和掌握解题要领。在选题上，有70%的题属于难度不大的基本题，20%属于加深加宽题，有10%是历届研究生入学时具有一定难度的试题。

本书是在唐延彩等编写的“模拟电子技术学习指导”讲义（用过四届）的基础上经过重大修改编写而成。第二、六章由唐延彩编写，第三、七章由常明兰编写，第四、八章由刘玉明编写，第十章由王晓明编写，第五章由卢胜编写，第一章由孙荣林编写，第九章由许晓华编写。

本书由唐延彩、常明兰、刘玉明主编，王晓明、卢胜、孙荣林、许晓华任副编。

全书的编写工作自始至终是在唐延彩老师的指导下进行的，并由唐延彩老师统稿；常明兰、刘玉明老师校对了全部书稿；刘玉明、王晓明、卢胜、孙荣林老师绘制了全部插图。

本书由青岛大学自动化系向国菊教授、徐茂荣副教授主审，对初稿提出了许多宝贵的修改意见；在编写过程中，得到校、院、系领导及有关同志的大力支持和帮助，在此一并表示感谢！

由于作者水平所限，成书仓促，错漏不当之处恐难避免，敬请读者批评指正。

编 者

1996年6月于青岛大学

目 录

前言

第一章 半导体器件基础 1

一、基本要求 1

二、基本内容 1

(一) 半导体基本知识 1

(二) 半导体二极管 6

(三) 晶体三极管 9

(四) 场效应晶体管 13

三、例题分析 14

第二章 放大电路基础 24

一、基本要求 24

二、基本内容 24

(一) 放大电路的基本概念 24

(二) 静态工作点及其估算 26

(三) 图解分析法 27

(四) 微变等效电路法 28

(五) 单独偏置直接耦合基本放大电路 28

(六) 阻容耦合基本放大电路 31

(七) 共发射极放大电路的频率响应 35

(八) 场效应晶体管放大电路 38

(九) 多级放大与组合放大单元电路 40

三、例题分析 43

第三章 差动放大电路 64

一、基本要求 64

二、基本内容 64

(一) 直接耦合放大电路的特点 及零点漂移问题 64

(二) 差动放大电路的形式 65

(三) 差动放大电路的四种输 入-输出方式 67

(四) 接有发射极调零电位器的典型 差动电路的计算 68

(五) 两差动对管的输入不平 衡时如何处理 68

三、例题分析 69

第四章 集成运算放大器基础 80

一、基本要求 80

二、基本内容 80

(一) 集成运算放大器的主要特 点和一般组成 80

(二) 集成运算放大器中的电流源电路 81

(三) 复合管及其应用 83

(四) 集成运算放大器的输出级 84

(五) 通用型集成运算放大器 F007 ($\mu A741$) 简介 85

(六) 集成运算放大器的主要技术指标 86

(七) 关于理想运算放大器的概念 87

三、例题分析 88

第五章 放大电路中的反馈 96

一、基本要求 96

二、基本内容 96

(一) 反馈的基本概念和类型 96

(二) 负反馈的四种基本组态 97

(三) 反馈组态的判别及信号源内阻 R_s 对反馈效果的影响 100

(四) 负反馈的基本公式及负反馈对放大 电路性能的影响 101

(五) 引入负反馈的基本原则 103

(六) 负反馈放大电路的分析计算 103

(七) 负反馈放大电路的自激振 荡及其消除 105

三、例题分析 106

第六章 集成运算放大器在线性电 路中的应用 124

一、基本要求 124

二、基本内容 124

(一) 集成运算放大器工作在线性区时 的主要特点 124

(二) 基本线性运算电路 125

(三) 电压-电流变换电路 132

(四) 运算放大器的非理想特性 所产生的误差 135

(五) 有源滤波电路 137

(六) 调节器电路 146

三、例题分析	153
第七章 集成运算放大器在非线性电 路中的应用	198
一、基本要求	198
二、基本内容	198
(一) 非线性运算电路	198
(二) 集成模拟乘法器及其应用	200
(三) 限幅电路	202
(四) 电压比较器	205
(五) 线性整流与绝对值电路	208
三、例题分析	210
第八章 波形产生电路	231
一、基本要求	231
二、基本内容	231
(一) 正弦振荡的基本概念	231
(二) RC 正弦波振荡电路	234
(三) LC 正弦波振荡电路	235
(四) 石英晶体振荡器	237
(五) 非正弦波产生电路 ——张弛振荡器	238
三、例题分析	241

第九章 功率放大电路	257
一、基本要求	257
二、基本内容	257
(一) 功率放大电路的主要特点	257
(二) 几个基本定义与概念	258
(三) 直接耦合功率放大电路 及其主要性能	259
(四) 集成功率放大器	262
(五) 变压器耦合功率放大电路	263
三、例题分析	266
第十章 直流电源	279
一、基本要求	279
二、基本内容	279
(一) 整流电路	279
(二) 滤波电路	281
(三) 硅稳压管稳压电路	282
(四) 串联稳压电路	283
(五) 集成三端稳压器及其应用	287
(六) 串联开关式稳压器	290
三、例题分析	291
参考文献	308

第一章 半导体器件基础

所有电子电路都需要用电子器件来构成,因而在学习模拟电子技术或数字电子技术时,都必须对半导体器件有相应的了解。本章着重对电子电路中常用的半导体二极管、硅稳压管、双极型晶体管、场效应晶体管等进行讨论。

一、基本要求

本着“管为路用”的原则,在基本了解了器件的结构特点及内部导电机理的前提下,重点掌握器件的外特性,熟悉器件的主要参数,学会根据不同要求合理地选用器件。

(1) 掌握半导体二极管的单向导电特性、伏安特性及开关特性,了解半导体器件中扩散与漂移的概念和PN结形成的原理。

(2) 掌握半导体晶体三极管(简称晶体管)的工作原理、输入和输出伏安特性;熟悉晶体管放大、饱和、截止三种工作状态的条件和特点;了解晶体管内部载流子的传输过程,主要参数 α 、 β 、 I_{CBO} 、 I_{CEO} 的物理意义,极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 的物理意义。

(3) 熟悉硅稳压管的稳压原理和主要参数。

(4) 熟悉场效应晶体管的工作原理和开关特性,了解场效应晶体管的有关参数及它的输出特性和转移特性。

二、基本内容

(一) 半导体基本知识

1. 导体、绝缘体和半导体 各种物质按其导电性能的不同,可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常用物质的电阻率(或电导率)的大小来加以区分,具体条件如表1-1所示。

表 1-1 导体、半导体和绝缘体

种类 \ 特性	电阻率 ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	温度特性
导体	$\rho < 10^{-4}$	正温度系数
半导体	$\rho = 10^{-4} \sim 10^{10}$	负温度系数
绝缘体	$\rho > 10^{10}$	负温度系数

由表1-1可知,导体的电阻率最低,铜和银的电阻率分别为 $1.67 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 和 $1.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$,导电性能较好。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,半导体材料硅(Si)的电阻率为 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,其电阻率较铜大 10^{11} 倍以上,说明它的导电性能比导体差得多。

从能级能带的概念来讲,绝缘体的禁带很宽,电子从价带跃迁到导带所需的激发能量很大($E_G = 10 \sim 30 \text{eV}$),电子不易被激发到导带中去,故不导电。导体铅的价带与导带有一部分互相重叠而无禁带,而铜的价带没有被价电子填满,电子为自由电子,这种价带本身就是导带。对于半导体,由于其禁带很窄(硅的 $E_G = 1.1 \text{eV}$,锗的 $E_G = 0.72 \text{eV}$),在温室下有少量

载流子被激发到导带中去，故可以导电，但导电能力很低。

导体电阻率为正温度系数，即温度升高使导体电阻增加。这是因为当温度升高时使电子的动能增大，增加了电子相互碰撞的几率，使自由电子的迁移率下降，电导率减小，电阻率增加。

对于半导体来讲，温度升高可以激发出更多的电子—空穴对，尽管温度升高使载流子的热运动加快而增加了相互碰撞的几率，但电子—空穴对的增加起主导作用，因而使电导率上升，电阻率下降，使半导体的体电阻减小，故为负温度系数。

对于绝缘体，温度的升高难以使电子通过禁带到达导带，因为电子从价带跃迁到导带所需的激发能量太大 ($E_G=10\sim30\text{eV}$)，但绝缘性能变差。

2. 本征半导体 纯净的半导体称为本征半导体。

在本征半导体中，由于晶体外层价电子为结合力很强的共价键结构。在 0K 时，晶体中无自由电子，半导体不能导电。在室温条件下，将有少量价电子获得足够的能量，克服共价键的束缚而成为自由电子，而在原共价键中却留下了一个空穴。由于存在这样的空穴，附近共价键中的电子就很容易进来补充，而在附近的共价键中留下一个新的空穴，其它地方的电子又有可能来填补后一个空穴。从效果来看，这种共有电子的填补运动，相当于带正电荷的空穴在运动，称之为空穴运动。因此，在温度升高或热激发条件下，本征半导体中存在着两种载流子——带负电的自由电子和带正电的空穴。在本征半导体中，自由电子（以后简称电子）和空穴总是同时产生并成对出现，成为电子—空穴对，故两种载流子浓度相等。

随着温度的升高，两种载流子的浓度不断增加。对于硅 (Si) 材料的本征半导体，温度每升高 8°C ，使载流子浓度增加一倍；对于锗 (Ge) 材料，温度每升高 12°C ，使载流子浓度增加一倍。

由以上分析可知，本征半导体中只有少数载流子在热激发下获得足够的能量形成电子—空穴对，载流子浓度很低，导电能力很弱，而且载流子浓度对温度很敏感。

深入分析知道，从能级能带的概念来讲，在热激发条件下，价电子挣脱共价键的约束从价带跃迁到导带，而空穴仍留在价带，故电子在导带参与导电，空穴在价带参与导电。

3. 杂质半导体 在本征半导体中掺入某种特定的微量元素后就构成了杂质半导体。半导体的导电能力由于掺杂就会产生质的变化，其电导率比本征半导体高几十万至几百万倍。

(1) N 型半导体 (电子半导体) 在四价元素的硅 (Si) 或锗 (Ge) 的晶体中，掺入少量的五价元素 (如磷、砷等)，则原来晶格中的某些硅原子被杂质原子所代替。由于杂质原子的最外层有五个价电子，与周围四个硅原子组成共价键时还多余一个电子，这个多余的电子不受共价键的束缚，只受自身原子核的束缚，这种束缚力比较弱，在室温时即可成为自由电子 (称为剩余电子)。掺杂浓度越高，剩余电子数越多，即电子浓度远大于本征半导体由于热激发所产生的空穴浓度，电子为多数载流子 (简称为多子)，空穴为少数载流子 (简称为少子)。这种杂质半导体称为 N 型半导体或电子半导体。

(2) P 型半导体 (空穴半导体) 在四价元素硅 (Si) 或锗 (Ge) 的晶体中掺入少量的三价元素 (如硼、镓、铟等)，杂质原子的最外层只有三个价电子，当它与周围的硅原子组成共价键时，由于缺少一个电子而形成空穴。因此，这种杂质半导体中空穴的浓度将比电子浓度高得多，故空穴 (带正电) 为多数载流子，电子为少数载流子，这种杂质半导体称为 P 型半导体或空穴半导体。

N型和P型半导体是半导体器件的基本材料。如果本征半导体是硅材料，则可能为N型硅材料或P型硅材料。如果本征半导体材料是锗，则可能是N型锗材料或P型锗材料。

杂质半导体中存在浓度相差极大的两种载流子——多子和少子。多子是由于掺杂而形成的，少子是由于热激发而产生的。在后面所讲的半导体器件中，多子构成导通电流，少子形成反向电流。

4. PN结 如果将一块半导体的两侧分别掺杂成N型和P型半导体，则在两者的交界处将形成一个PN结。

二极管具有一个PN结，三极管具有两个PN结，晶闸管具有三个PN结。因此说，了解PN结的形成及特点对于了解半导体器件的结构和工作原理是至关重要的。

(1)PN结的形成 在N型半导体和P型半导体的交界面两侧，由于电子和空穴浓度相差悬殊，故将产生扩散运动。由于N区中电子多、空穴少，P区中空穴多、电子少，于是N区中的多数载流子电子，P区中的多数载流子空穴，相互向对方进行扩散，如图1-1a所示。在交界面附近，电子与空穴相遇将发生复合而消失，使N区失去电子形成正离子区，P区失去空穴形成负离子区，在交界面附近形成一个偶电层，如图1-1b所示。

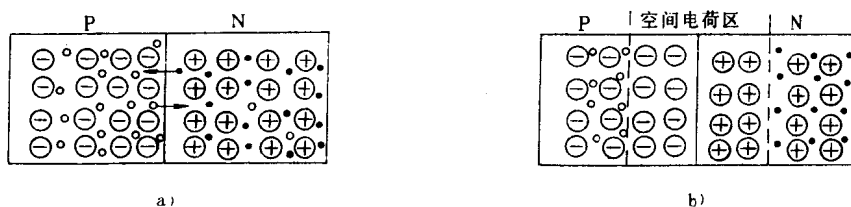


图 1-1 PN结的形成

a) 多子的扩散运动 b) 形成空间电荷区

偶电层内的正负离子均因不能够移动而不参与导电，这些不能移动的带离子称为空间电荷，即在P区和N区交界面附近形成一个很薄的空间电荷区；空间电荷区内的多数载流子由于复合而消耗尽了，故又称其为耗尽层；简称PN结。多数载流子的扩散越强，PN结就越宽。

另一方面，由于空穴带正电，电子带负电，空间电荷区内的正、负离子所形成的内电场将阻止多数载流子扩散运动的进一步进行，故空间电荷区又称为阻挡层。

除存在上述多子的扩散运动外，还存在少子在内电场作用下所产生的漂移运动。N区中的少子空穴及P区中的少子电子，在内电场的作用下相互向对方运动，其结果使PN结变窄。

由此可见，这里存在着多子的扩散与少子的漂移两种运动。开始时以扩散运动为主，使PN结形成并逐渐变宽，随着PN结的增宽使内电场增强，从而阻止扩散而加强漂移运动的进行，这说明扩散与漂移是两个既有联系又有矛盾的运动；当扩散与漂移达到动态平衡时，PN结宽度基本不变。由于扩散电流与漂移电流在动态平衡时大小相等方向相反。因此，无外电场作用时，PN结中无电流流过，PN结内电场所形成的电位差，主要用来抵消由于浓度差而形成的多子扩散电流，从而保持N区和P区的电的中性。

综上所述，PN结的形成可归纳为：

由于浓度不同, 首先进行多子扩散, 在多子扩散的同时产生内电场。随着扩散的进行使PN结变宽, 从而使内电场加强, 反过来又阻止扩散的进一步进行而使漂移运动加强。当扩散与漂移处于动态平衡时, 形成了宽度基本不变的PN结。

(2) PN结的单向导电性

1) PN结正偏时, 正向电阻很小, PN结导通。将外加电源电压的正极接至PN结的P区, 负极接至PN结的N区, 如图1-2所示, PN结的这种接法称为正偏。

外接电压所形成的外电场与内电场方向相反, 在外电场作用下, P区的空穴向右移动, 与PN结中的部分负离子中和; N区中的电子向左移动, 与PN结中的一部分正离子中和, 结果使PN结变窄, 正向电阻变小。由于PN结变窄(相当于电位壁垒降低), 使内电场削弱, 使多子的扩散运动增强, 少子的漂移运动大大减弱, 形成一个较大的扩散电流(正向电流) I_F , 其方向为在PN结中从P区流向N区。

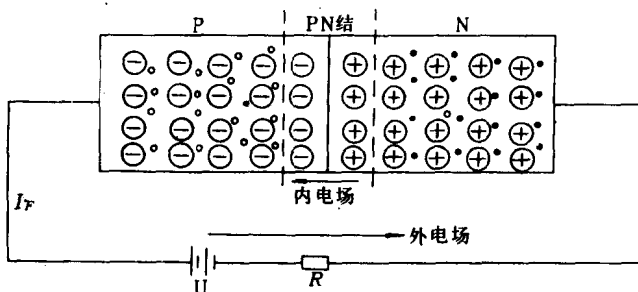


图 1-2 PN结正偏

2) PN结反偏时, 反向电阻很大, 只有很小的反向电流 I_R , PN结截止。

将外电压的正极接至N区, 负极接至P区的偏置方法称为反偏, 如图1-3所示。

此时外电场的方向与内电场一致, 增强了内电场的作用。

在外电场作用下, P区中的多子空穴和N区中的多子电子均背离PN结方向移动, 使PN结变宽, PN结电阻增大。少子漂移运动形成的反向电流 I_R 超过扩散电流 I_F , 当反向电压超过零点几伏时, 在一定温度下, 反向电流 I_R 不再随外加反向电压的增加而增加, 故称为反向饱和电流 I_S 。 I_S 是由少子形成的, 故对温度很敏感, 随着温度的升高, I_S 将急剧增大。

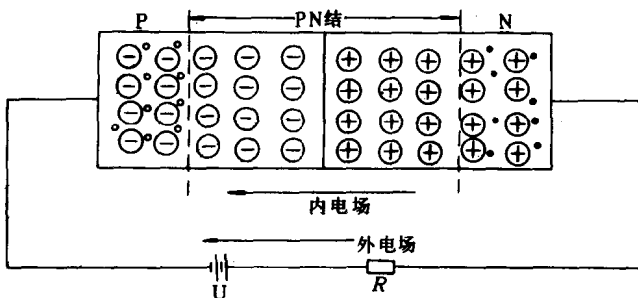


图 1-3 PN结反偏

综上所述, PN结正偏时导通, 形成较大的正向电流; 反偏时截止, 反向电流很小, 这就是PN结的单向导电性。

(3) PN结的伏安特性 PN结两端电压 U 与PN结电流间关系为

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

式中 $U_T = KT/q$ 称为温度电压当量。

在 $T = 300\text{K}$ 时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。正偏时, $U \gg U_T$, 故 $I \approx I_S e^{\frac{U}{U_T}}$ 。反偏时, $|U| \gg U_T$, 且 $U < 0$, 故 $I \approx -I_S$ 。其伏安特性如图1-4所示。

(4) PN 结击穿特性 反向电压超过 $U_{(BR)}$ 时, 反向电流急剧增加的现象称为反向击穿, 电压 $U_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。

反向击穿有齐纳击穿和雪崩击穿两种。

齐纳击穿——反向电压所形成的外电场破坏了共价键结构, 把价电子从共价键中直接“拉出来”, 产生大量的电子—空穴对, 从而使少子急剧增加。硅稳压管大多属于这种击穿, 故又称其为齐纳二极管。

雪崩击穿——反向电压增大时所形成的强电场, 使漂移过程中的少子受到加速, 可能与共价键中的价电子相碰撞而将价电子“撞了出来”, 产生了新的电子—空穴对, 这些新的电子、空穴被加速后再去撞击其它的价电子, 依次类推, 少子像雪崩似地倍增引起了反向电流的急剧增加, 一般二极管多为雪崩击穿。

如果不采取限流措施, 使 PN 结的功耗超过它所允许的功耗, 就可能使 PN 结温度过高而烧毁, 这种现象称为热击穿, 要尽量避免产生热击穿。

(5) PN 结的电容效应 当交流信号的频率较高时, PN 结的单向导电性由于 PN 结的电容效应而变差, 这是由于电容效应对交流电形成通路所致。PN 结的等效电容有势垒电容和扩散电容两种。

1) 势垒电容 C_b C_b 是由阻挡层引起的, 阻挡层中不能移动的正、负离子相当于电容存储的电荷, 由于缺少导电粒子(载流子)相当于介质, 阻挡层两侧的 P 区和 N 区因电导率较高而相当于两块极板, 构造上类似于平板电容。当外加电压变化时, 阻挡层宽度即正、负离子数在变化, 相当于电荷量在变化, 类似于电容的充放电。

当 PN 结正偏时, 阻挡层变窄, 空间电荷减少, 相当于势垒电容放电。当 PN 结反偏时, 阻挡层增宽, 空间电荷增加, 相当于势垒电容充电。

C_b 并非常数, 与外加电压的极性和大小有关。正偏使阻挡层变窄从而使 C_b 增大, 反偏使 C_b 减小。但正偏时 PN 结电阻很小, C_b 虽大但作用不明显, 反偏时 C_b 虽然较小, 但反向电阻却很大, C_b 的作用在高频时就很显著。因此, 只有在反偏时才考虑势垒电容 C_b 的影响。一般 $C_b = n + pF \sim$ 几百 pF, C_b 越小, 管子的开关速度就越高。

2) 扩散电容 C_d 当 PN 结正偏时, 扩散到对方区域的多子变成了少子, 这少子的存储作用形成了扩散电容。

设 N 区的电子向 P 区扩散, 在 P 区电子成为少子, 在 P 区界面附近电子浓度最大, 然后按指数规律下降, 如图 1-5 所示。

图中 n_{p0} 为平衡时的电子浓度, $n_{p(0)}$ 表示曲线①在 P 区界面 ($x=0$) 处的电子浓度 (最大)。

当外加正偏电压增加时, 扩散到 P 区的电子数增加, 电荷量增加 ΔQ_1 , 如曲线②。当外加正偏电压下降时, 扩散到 P 区的电子数减少, 电荷量下降 ΔQ_2 , 如曲线③。这说明, 当外加正偏电压变化时, 相应地存在载流子的增加或减少, 由于积累在 P 区的电子电荷随外电压

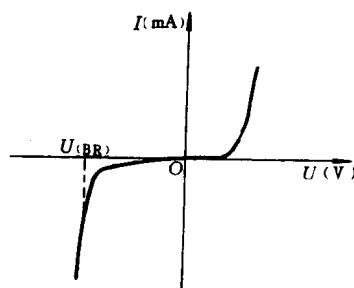


图 1-4 PN 结伏安特性

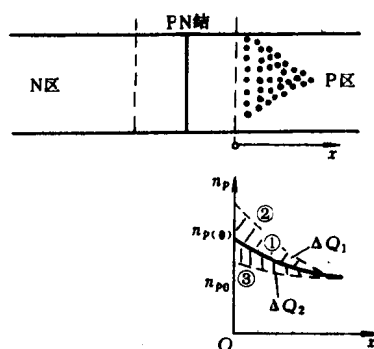


图 1-5 P 区少数载流子浓度分布曲线

变化而变化,这就说明存在等效电容 C_d ,称 C_d 为扩散电容。显然,只有PN结正偏时才考虑,扩散电容在高频时的影响。PN结的结电容 $C_j = C_b + C_d$ 。

(二) 半导体二极管

半导体二极管由PN结加两根引线封装而成,其符号如图1-6所示。其中阳极(正极)从P区引出,阴极(负极)从N区引出。

二极管按材料来分,有硅二极管(如2CP10)和锗二极管(如2AP9)。按结构来分有点接触型(如开关管)和面接触型(如大电流整流管)。

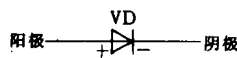


图1-6 二极管符号

1. 二极管伏安特性 由于二极管存在引线电阻和欧姆接触电阻及表面漏电流,故二极管的特性与PN结略有区别,但在工程上往往不予考虑。

二极管方程近似为PN结电流方程,即

$$I = I_s(e^{U/U_T} - 1)$$

正向特性: $I \approx I_s e^{U/U_T}$

反向特性: $I \approx -I_s$

(1) 正向特性 二极管伏安特性曲线如图1-7所示。

当二极管正偏电压 U 小于导通电压(死区电压) U_{T0} 时,由于外电场不足以克服PN结的内电场,此时正向电流几乎为零,正向特性的这一部分称为死区。死区电压的大小与二极管的材料有关,在室温下,硅管的 $U_{on} \approx 0.5V$,锗管的 $U_{on} \approx 0.1V$ 。

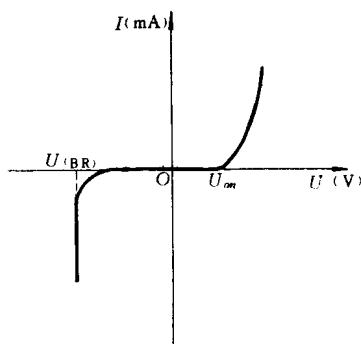


图1-7 二极管伏安特性

当正向电压超过死区电压 U_{T0} ,随着外加电压 U 的增加,正向电流迅速增大,二极管处于完全导通状态,此时二极管的导通压降(管压降)除与二极管的材料有关外,还与导通电流大小有关。在正向导通电流不太大的情况下,硅管的导通压降为 $0.6 \sim 0.8V$,计算时一般取 $0.7V$,锗管的导通压降为 $0.1 \sim 0.3V$,计算时一般取 $0.2V$ 。

(2) 反向特性及反向击穿特性 二极管反偏时,在反向电压不是很高的较大范围内,反向电流基本上不随反向电压变化,故称为反向饱和电流。当反向电压增大到 $U_{(BR)}$,使反向电流急剧增大时的现象称为反向击穿, $U_{(BR)}$ 为反向击穿电压。

硅管的反向电流很小, $I_s \leq 0.1\mu A$; 锗管的反向电流较大,约 $n + \mu A$ 。因此硅管的温度稳定性比较好,但锗管的正向导通电阻比硅管小。

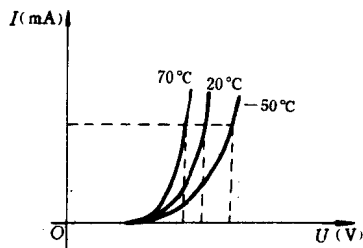


图1-8 2CP10的正向伏安特性

2. 二极管的温度特性 以硅管(2CP10)为例来观察它的正向特性与温度的关系。

温度升高时,正向特性曲线向左移。在流过同样电流的情况下,温度升高,管压降减小。在室温附近,温度每升高 $1^\circ C$,正向压降减小 $2 \sim 2.5mV$,温度每升高 $10^\circ C$,反向电流约增加1倍。

3. 二极管主要参数

(1) 最大整流电流 I_F 指长期运用时允许通过的最大正向平均电流。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 指二极管允许所加反向电压的峰值。

(3) 最高工作频率 由结电容大小决定, 对于检波管, 开关管应选结电容小的二极管。

4. 二极管的开关特性 由于半导体二极管具有单向导电性, 即外加正向电压时, 二极管导通; 外加反向电压时, 二极管截止。因此, 可以把二极管当作受外加电压控制的开关。

图 1-9 所示电路是一个最简单的二极管开关电路, U_s 为外加电压, R 为限流电阻, V 为开关二极管。

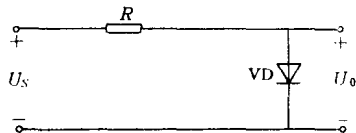


图 1-9 二极管开关电路

(1) 理想二极管 当图 1-9 中的 R 和 U_s 都很大, 二极管的导通压降 (或导通电阻) 可忽略不计时, 一般可认为 V 为理想二极管。

理想二极管的特点是加正向电压时, 二极管导通, 正向压降 (或正向导通电阻) 为零, 相当于开关闭合。加反向电压时, V 截止, 电流为零 (或内阻无穷大), 相当于开关断开。其伏安特性如图 1-10a 所示。

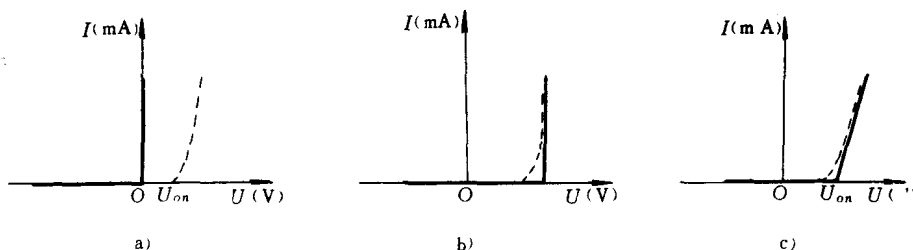


图 1-10 二极管不同工作状态时的伏安特性

a) 理想状态 b) 开关等效 c) 折线等效

(2) 开关等效电路 当图 1-9 中的 U_s 较大, 且 R 远大于二极管导通电阻 r_{on} 时, 此时二极管的导通压降不能忽略, 但导通电阻可以忽略, 伏安特性如图 1-10b 所示。

(3) 折线等效电路 当图 1-9 中的 U_s 和 R 均很小时, 二极管的导通电压 U_{on} 和导通电阻均不能忽略, 伏安特性如图 1-10c 所示。

(4) 二极管的开关条件及特点

1) 截止条件 $U < U_{on} = 0.5V$

特点: $I_D \approx 0$ $r_D \approx \infty$, 相当于开关断开。

2) 导通条件 $U \geq 0.7V$

特点: $U_D \approx 0.7V$, $r_{on} \approx 0$, 相当于开关闭合。

5. 硅稳压管 由二极管伏安特性曲线知道, 硅二极管较锗二极管的反向击穿特性曲线陡得多, 这就是为什么稳压二极管采用硅材料的原故。实际上, 硅稳压管较硅二极管的反向击穿特性更陡峭, 这是由于硅稳压二极管的结构特点所致。

(1) 硅稳压管的结构特点及稳压原理 硅稳压管是一种用特殊工艺制造的面结型硅半导体二极管, 其结构特点是掺杂浓度高, 空间电荷区内的电荷 (正、负离子) 密度大, 因而耗

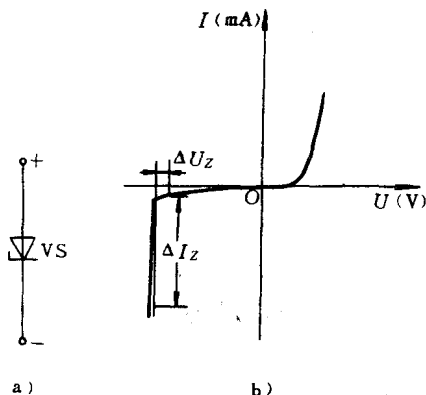


图 1-11 稳压管符号及伏安特性

a) 符号 b) 伏安特性

尽层很窄，容易形成强电场。当反向击穿时，反向电流急增，反向击穿特性特别陡峭。稳压管符号及伏安特性如图 1-11 所示。

由曲线知道，当反向电压增加到击穿电压 U_z 时，由于击穿特性曲线很陡，反向电流变化量 ΔI_z 很大时，电压的变化量 ΔU_z 却很小，这就是稳压。反向击穿特性越陡，动态电阻（稳压管的内阻） $r_z = \Delta U_z / \Delta I_z$ 就越小，稳压性能就越好。

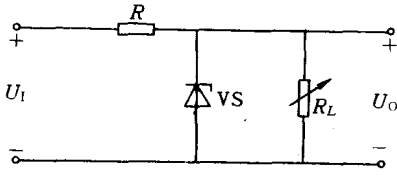


图 1-12 稳压管稳压电路

稳压管工作于反向击穿状态，为保证其功耗限定在允许范围以内，必须按图 1-12 所示的方法接限流电阻 R ，否则将会由于功耗过大使结温过高，由电击穿转化为热击穿，从而损坏稳压管。

(2) 稳压管的主要参数

1) 稳定电压 U_z 。 U_z 指反向击穿电压，手册上通常给定一个范围，具体数值与稳压管中流过的电流有关。

2) 稳定电流 I_z 。 I_z 指正常工作时的参考电流，要求 I_z 满足 $I_{zmin} < I_z < I_{zmax}$ ，其中 I_{zmin} 、 I_{zmax} 为能够稳压的两个极限值。

3) 动态内阻 r_z 。 $r_z = \Delta U_z / \Delta I_z$ ，一般为几 Ω 至几十 Ω 。 r_z 越小，说明反向击穿特性越陡，稳压特性越好。

4) 额定功耗 P_z

$$P_z = U_z I_{zM}$$

5) 温度系数 α 反映 U_z 受温度影响的参数。

$U_z < 4V$ 时，属于齐纳击穿，具有负温度系数；

$U_z > 7V$ 时，属于雪崩击穿，具有正温度系数。

$U_z = 4 \sim 7V$ 时，温度系数很小； $U_z = 6V$ 时，几乎为零温度系数，稳压值 U_z 受温度影响极小。

6. 特殊二极管简介

(1) 发光二极管 这种管子通常用磷化镓（绿光）或磷砷化镓（红光）等混合物制成。当通有电流时，由于电子与空穴直接复合释放出能量而发光，其导通时管压降在 2V 左右。发光二极管符号如图 1-13 所示。



图 1-13 发光二极管符号

(2) 光电二极管和光电池 硅光电二极管（也称光敏二极管）是以 N 型硅为衬底，用光刻工艺刻出光敏区的窗口，再扩散硼以形成 PN 结，引出两个电极封装而成的。当光透过 P 型半导体的薄膜照到 PN 结上时，光子将能量传给价带中的电子，使其受到激发而从价带跃迁到导带，成为光生载流子，在外电场的作用下形成光电流。其符号及伏安特性如图 1-14 所示。

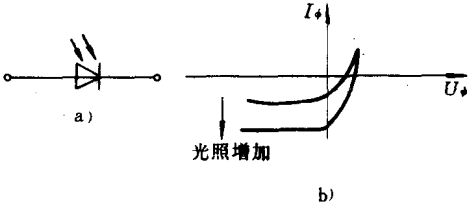


图 1-14 光电二极管符号与伏安特性

光电二极管工作于反向电压状态下，其电流为反向电流，其伏安特性如图 1-14b 的第三象限所示的恒流特性。光电池的 PN 结面积较大，不需

a) 符号 b) 伏安特性

外加电压,工作于图中的第四象限,短路电流基本上与光照成正比。光电池的符号如图 1-15 所示。工作于第一象限的光电器件,即为发光二极管。

(3) 变容二极管 二极管反向偏置时其势垒电容随反向电压的变化而变化。根据这一特点,可制作成变容二极管,其符号如图 1-16 所示。

变容二极管在高频电子技术中应用较多,可构成变容二极管调频振荡器等。

(三) 晶体三极管

晶体三极管简称晶体管,晶体管按材料不同可分为硅管和锗管;按结构不同可分为 NPN 型管和 PNP 型管;按功率大小不同分为大、中、小功率管;按工作频率不同又可分为低频管和高频管。由于晶体管内有电子和空穴两种载流子参与导电,故又称为双极型晶体管。

1. 晶体管的结构特点 NPN 型晶体管的结构和符号如图 1-17 所示。

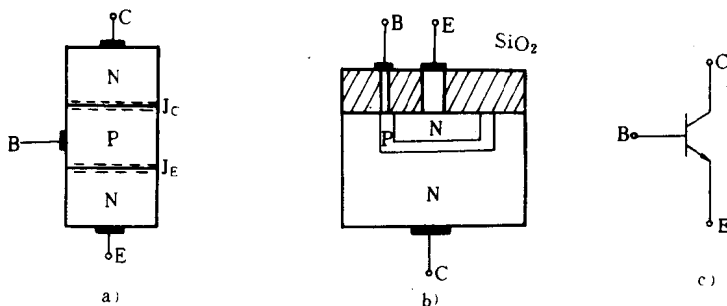


图 1-17 NPN 型晶体管

a) 结构示意图 b) 管芯结构图 c) 符号

从结构来看,晶体管有发射区、基区、集电区三个区,发射结 J_E 、集电结 J_C 两个 PN 结,发射极、基极、集电极三个引出电极。其结构特点为:

(1) 发射区的掺杂浓度很高,发射区的作用是向基区发射大量的多子。对 NPN 管,发射多子电子;对 PNP 管,发射多子空穴。

(2) 基区厚度很薄,通常只有几 μm 到十几 μm ,而且掺杂浓度低。这一特点使到达基区的多子(在基区成为少子)在基区的复合机会很少,使基极电流很小。基区的作用是传递和控制载流子。

(3) 集电区的面积较大,掺杂浓度较低,其作用是收集载流子。由于集电区与发射区差别很大,故该两电极不可互换使用。

2. 晶体管的放大作用 放大是对变化量而言,放大的实质是对能量的控制作用。

晶体管之所以能放大,其原因有两个。一是具有上述内部结构特点,这是内部条件。二是必须满足外部条件,发射区要发射多子,故发射结要外加正向偏置,集电区要收集穿过基区到达集电结界面附近的载流子,故集电结要加反偏电压。

现以接成共发射极电路的 NPN 管为例,分析其放大原理。

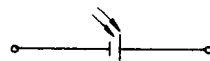


图 1-15 光电池符号

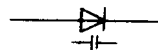


图 1-16 变容二极管符号

(1) 晶体管内部载流子的传输过程 晶体管内部载流子的运动和各级电流如图 1-18 所示。

1) 发射区向基区发射(注入)电子的过程 发射结电压 $U_{BE} > 0.5\text{V}$ 时, 发射区的电子扩散到基区, 基区的空穴也向发射区扩散, 扩散电流分别为 I_{EN} 、 I_{EP} , 方向一致, 共同构成了发射极电流 I_E , 故

$$I_E = I_{EN} + I_{EP}, \text{ 其中 } I_{EN} \gg I_{EP}$$

2) 电子在基区的扩散与复合过程 注入到基区的电子大多数移向集电结, 极少数的电子与基区空穴复合而消失。设复合掉的电子电流为 I_{BN} , 此为基区减少的空穴所形成的电流。为保持动态平衡, 电源 U_{BB} 的正极板从基区拉走相当于 I_{BN} 的电子数, 使基区留下相应的空穴, 所以 I_{BN} 构成了基极电流的主要部分。因此说, 基极电流主要由发射区来的电子与基区空穴复合而成。

3) 集电区收集电子的过程 集电结加反偏电压, 扩散到基区靠近集电结的电子(这时成为少数)在 J_C 结的加速电场的作用下漂移到集电区, 成为集电极电流 I_C 的主要组成部分, 记成 I_{CN} , $I_{CN} = I_{EN} - I_{BN}$ 。

4) 集电极的反向电流 集电区的少数空穴及基区的少数电子在 J_C 结反向电压作用下形成反向饱和电流 I_{CBO} 。

由以上分析, 三个电极的电流关系为

$$I_E = I_{EN} + I_{EP} = I_{CN} + I_{BN} + I_{EP} \approx I_{CN} + I_{BN}$$

$$I_B = I_{BN} + I_{EP} - I_{CBO} \approx I_{BN} - I_{CBO}$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CBO}$$

(2) 电流分配关系 晶体管制成后, 只要工作于放大状态, I_{CN} 与 I_{BN} 的比值在一定条件下基本上为一定值。

1) 直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 和 $\bar{\beta}$

$\bar{\alpha}$ 为共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha} = I_{CN}/I_E \approx I_C/I_E$

$\bar{\beta}$ 为共发射极直流电流放大系数, $\bar{\beta} = I_C/I_B$

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}} \quad \bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

2) 电流分配关系

$$I_E = I_C + I_B \approx (1 + \bar{\beta}) I_B$$

$$I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} \approx \bar{\alpha} I_E$$

$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta} I_B$$

I_{CBO} 为基极反向饱和电流

I_{CEO} 为穿透电流, 且

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

(3) 晶体管的电流放大作用

因为 $\Delta I_C = \alpha \Delta I_E$ 所以

$$\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$$

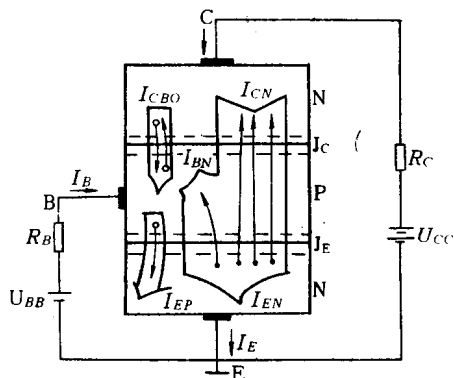


图 1-18 晶体管内部载流子运动和各级电流

因为 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 所以 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$

α 、 β 分别为交流电流放大系数, 表示两个变化量之比, 且 $\alpha = \beta / (1 + \beta)$, $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ 。

电流控制关系的表达式一般写成 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$ 或 $\Delta I_C = \alpha \Delta I_E$ 及 $\Delta I_E = (1 + \beta) \Delta I_B$ 。

由于 $\beta \gg 1$, 所以晶体管具有电流放大作用。也就是说, 利用 ΔI_B 控制 ΔI_C (或 ΔI_E)。因此说, 晶体管是一个电流放大器件, 被放大的电流变化量 ΔI_C 通过集电极负载电阻 R_C (或 $R_C // R_L$) 便可获得放大的输出电压。

3. 晶体管共发射极输出特性 晶体管共发射极输出特性曲线如图 1-19a 所示。

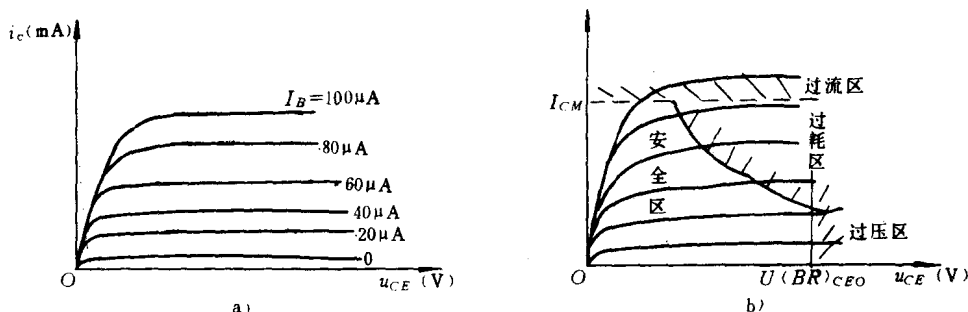


图 1-19 晶体管共射输出特性曲线

a) 伏安特性曲线 b) 安全工作区

(1) 截止区 当 $U_{BE} < 0.5V$ 时, $I_B \leq 0$, 晶体管处于截止状态, 因此 $I_B = 0$ 的一条曲线以下部分称为截止区。事实上因为 $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$, 当 $I_B = 0$ 时, $I_C = I_{CEO}$, 即晶体管并没有真正截止。但考虑到 I_{CEO} 对硅管来讲很小, 大约在 $1\mu A$ 以内。对锗管大约在几百 μA 以内, 故常可忽略不计。因此, 规定 $I_B \leq 0$ 为截止区, 从实用角度来讲完全可以。

一般地讲, 晶体管处于可靠截止的条件是发射结反偏, 即 $u_{BE} < 0$, 此时 $I_B = 0$, $I_C \approx 0$, 相当于三个电极断开。

(2) 放大区 当 $u_{BE} > 0.5V$, $u_{BC} < 0$ 时, 晶体管工作在放大区。此时 $I_C = \beta I_B + I_{CEO} \approx \beta I_B$, $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$, 集电极电流受基极电流控制, 而与 u_{CE} 无关, 曲线近似为水平的直线。在放大区, 可以根据 ΔI_B 对应的 ΔI_C 值求出共发射极电流放大系数 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$, 或再根据式 $\alpha = \beta / (1 + \beta)$ 求得共基电流放大系数 α 。事实上, 特性曲线随着 u_{CE} 的增加略有上翘, 这是由于基区调宽效应所致。

(3) 饱和区 当 $u_{BE} \approx 0.7V$, $u_{CE} > 0V$ 时, 集电极电流不再受基极电流控制, 晶体管进入饱和状态。晶体管特性靠近纵轴的上升部分, 对应于不同 I_B 值的各条曲线几乎重叠在一起, 这个区域称为饱和区。晶体管处于饱和状态时, 对硅管 $u_{CE} = u_{CES} \leq 0.3V$, 对锗管 $u_{CE} = u_{CES} \leq 0.1V$ 。

(4) 非安全工作区 图 1-19b 示出了过电流区、过电压区和过耗区, 晶体管正常工作时不能进入这些非安全工作区。

4. 晶体管的开关条件与特点 在模拟电路中, 晶体管主要用来放大; 在数字电路中, 晶体管经常工作于开关状态。管子的截止状态和饱和状态是开关工作时的两种稳态, 而放大状态是管子从一种稳态向另一种稳态过渡的状态。

现以硅 NPN 型晶体管为例说明开关条件及特点。

(1) 截止条件及特点

截止条件：偏置条件 $u_{BE} < 0.5\text{V}$ (可靠截止 $u_{BE} < 0\text{V}$)， $u_{BC} < 0\text{V}$ ，基极电流 $I_B \leq 0$ 。

特点： $I_B = 0$ ， $I_C \approx 0$ ， $u_{BE} < 0.5\text{V}$ ， $u_{CE} \approx U_{CC}$ ，C-E 间导通电阻很大，近似为开路。

(2) 放大条件及特点

放大条件：偏置条件 $u_{BE} > 0.5\text{V}$ ， $u_{BC} < 0\text{V}$ ，基极电流 $I_{BS} > I_B > 0$ 。

特点： $I_C = \beta I_B$ ，具有控制作用， $0.5\text{V} < u_{BE} < 0.7\text{V}$ ， $u_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$ ，C-E 间导通电阻为受控电流源电阻，这个电阻随 I_C 变化而变化， I_C 大时内阻小，反之亦然。

(3) 饱和条件及特点

饱和条件：偏置条件 $u_{BE} \geq 0.7\text{V}$ ， $u_{BC} > 0\text{V}$ ，基极电流 $I_B \geq I_{BS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{\beta R_C} \approx \frac{U_{CC}}{\beta R_C}$ 。

特点： $I_C = I_{CS} = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C}$ ， $u_{BE} = 0.7\text{V}$ ， $u_{CE} = U_{CES} \leq 0.3\text{V}$ ，C-E 间导通电阻很小，相当于开关闭合。

5. PNP 型晶体管 PNP 型管与 NPN 型管的结构特点和工作原理基本相同，只是三个区的掺杂情况与 NPN 管不同，所以外加电压、电流方向存在着差别。

PNP 型管共发射极基本放大电路如图 1-20 所示。

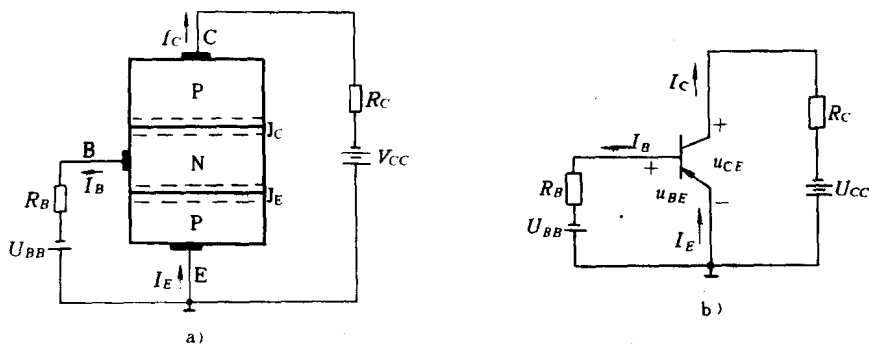


图 1-20 PNP 管电路

a) 结构示意图 b) 电原理图

发射区的多子空穴浓度很高，集电区空穴浓度较低，基区做得很薄，而且多子（电子）浓度很低。要求晶体管工作于放大状态时，则需要发射结正偏，集电结反偏。因此，外加电压 U_{BB} 、 U_{CC} 的极性与 NPN 管相反，即 $u_{BE} < 0$ ， $u_{BC} > 0$ ， U_{BB} 、 U_{CC} 电源电压对地均为负极性。

在外加电压作用下，发射区向基区发射空穴，形成发射极电流 I_E ，其方向与空穴运动方向相同，即由发射极流入晶体管。基极电流主要由外电路补充基区复合掉的电子形成的，即由 U_{BB} 的负极向基区补充电子。故 I_B 的方向由管子流出基极。集电极电流 I_C 主要由收集的发射区通过基区到来的空穴电流组成，其方向由管子流出集电极。可见， I_E 、 I_B 、 I_C 方向正好与 NPN 管相反。PNP 管符号如图 1-20b 所示，图中有关电流的方向即为实际方向，而 u_{BE} 、 u_{CE} 的极性与实际极性相反，故 $u_{BE} < 0$ ， $u_{CE} < 0$ 。

PNP 管的特性曲线与 NPN 管的特性曲线一样，只是横轴 u_{BE} 或 u_{CE} 为负值。

处于放大电路中的晶体管，三个电极对地电位应满足如下关系：

对于 NPN 型管，应满足 $U_C > U_B > U_E$ ；

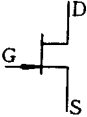
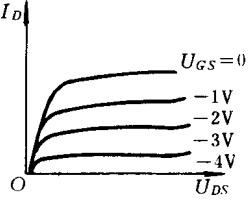
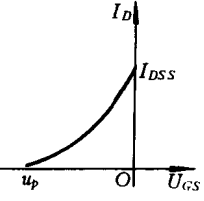
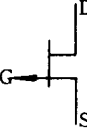
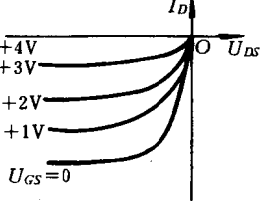
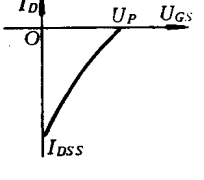
对于 PNP 型管，应满足 $U_C < U_B < U_E$ 。

(四) 场效应晶体管

场效应晶体管是用电场效应控制电流的一种半导体器件，利用栅—源电压控制漏极电流，而且栅极几乎不取电流，因此它属于一种电压控制器件，由于只有多子参与导电，故又称为单极性结型晶体管。

1. 结型场效应晶体管 结型场效应晶体管有 N 沟道和 P 沟道两种。N 沟道结型场效应晶体管的基片为 N 型硅片，P 沟道结型场效应晶体管的基片为 P 型 Si 片，两者均属于耗尽型，其符号、输出特性、转移特性如表 1-2 所示。

表 1-2 结型场效应晶体管符号和特性曲线

种 类	符 号	输出特性	转移特性
N 沟 道 结 型			
P 沟 道 结 型			

对于 N 沟道结型场效应晶体管，正常工作时 $u_{GS} < 0$ ，夹断电压 $U_P < 0$ ，饱和漏电流 $I_{DSS} > 0$ 。对于 P 沟道结型场效应晶体管，正常工作时 $u_{GS} > 0$ ，夹断电压 $U_P > 0$ ， $I_{DSS} < 0$ 。结型场效应晶体管由于栅极和沟道之间的 PN 结反偏，所以栅极基本上不取电流。

2. 绝缘栅场效应晶体管 (MOS 管) 由于 MOS 管的栅极被 SiO_2 绝缘层隔离，因此其输入电阻 r_{GS} 可高达 $10^9 \Omega$ 以上，故栅极不取电流。从导电沟道来分，MOS 管也有 N 沟道和 P 沟道两种类型，无论 N 沟道或 P 沟道又都可以分成增强型和耗尽型两种，在数字电路中主要使用增强型 MOS 管。

(1) 增强型 N 沟道 MOS 管 (NMOS) 当 $u_{GS} < U_{TN}$ 时，管子内部漏源之间无导电沟道，尽管 $U_{DS} > 0\text{V}$ 。漏极电流 $I_D = 0$ ，管子处于截止状态，其中 $U_{TN} > 0\text{V}$ 。当 $u_{GS} > U_{TN}$ 时，D-S 间形成了导电沟道，在 U_{DD} 的作用下，有漏极电流产生 (即 $I_D > 0$)， I_D 方向由漏极 D 经导电沟道流向源极 S。漏极电流 I_D 的大小与沟道电阻有关，受栅源电压 u_{GS} 控制 MOS 管导通后，导通电阻 r_{on} 很小，约几百 Ω ，此时 D-S 间相当于开关闭合。

(2) 增强型 P 沟道 MOS 管 (PMOS) 当 $u_{GS} > U_{TP}$ ($U_{TP} < 0$) 时，D-S 之间没有形成导电沟道， $I_D = 0$ ，管子处于截止状态。

当 $u_{GS} < U_{TP}$ 时，D-S 间形成导电沟道，在 U_{DD} ($U_{DD} < 0$) 的作用下，有漏极电流产生 (即 $I_D > 0$)， I_D 方向由源极经导电沟道流向漏极。

(3) 耗尽型 MOS 管 增强型 NMOS 管当 $u_{GS} > U_{TN}$ 时 (增强型 PMOS 管当 $u_{GS} < U_{TP}$ 时)，