

第五章 半导体器件基础与二极管电路

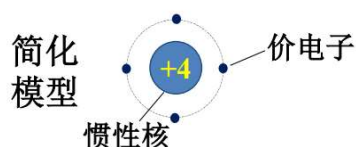
- 传感器：将非电信号转换为电信号

5.1.1 PN结及其单向导电性

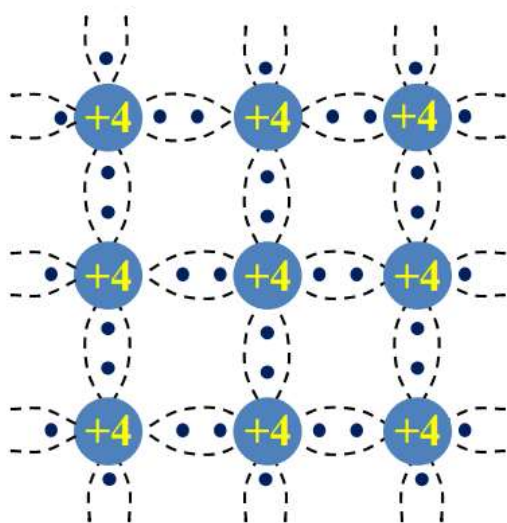
- 半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的物质
 - 例如硅、锗、砷化镓等材料
 - 具有独特的光敏、热敏和掺杂特性

一、本征半导体

- **定义**：纯净、不含杂质、晶体结构完整的半导体称为本征半导体。
 - 硅/锗原子结构的简化模型：



- 硅/锗的共价键结构：



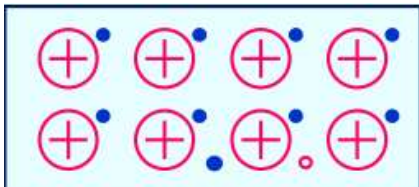
- **特性**
 - 本征激发：在光和热的作用下，本征半导体中产生电子-空穴对的现象。
 - 自由电子：脱离出共价键的电子。
 - 价电子：处于共价键中的电子。
 - 价电子移动形成电子电流。
 - 空穴：共价键中电子脱离后留下的空位。
 - 空穴移动形成空穴电流。
 - 空穴移动产生的电流实际上是价电子移动产生的电流。
 - **载流子**：能够导电的带电粒子，在半导体中有自由电子和空穴。
 - 复合：自由电子与空穴相遇，填补了空位，视为电子和空穴都消失

二、杂质半导体

- 多数载流子，简称多子
- 少数载流子，简称少子

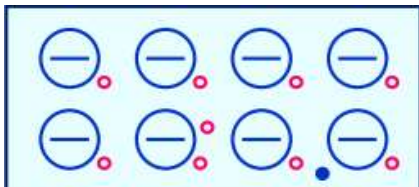
1. N型半导体

- 杂质：+5价元素，如磷
- 电子为多子
- 空穴为少子
- 载流子数≈电子数
- 简化模型



2. P型半导体

- 杂质：+3价元素，如硼
- 空穴为多子
- 电子为少子
- 载流子数≈空穴数
- 简化模型



三、PN结

- 扩散运动：由于浓度差异而形成的定向移动，主要是多子扩散
- 漂移运动：由于电场作用而形成的定向移动，主要是少子漂移

1. 形成

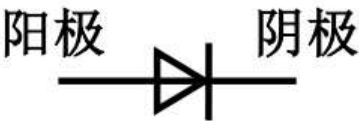
- 载流子的浓度差引起多子的扩散，两种载流子在交界面复合，使得交界面处只剩下杂质离子，形成了空间电荷区，即PN结，又称耗尽区
- 在空间电荷区中，由杂质离子产生的内电场的场强方向由N区指向P区，该场强会抑制扩散作用，加强漂移作用，最终扩散和漂移达到动态平衡

2. 单向导电性

- 正向偏置，简称正偏
 - P区接正极，N区接负极
 - 内外电场反向
 - 外电场使多子向PN结移动中和部分离子，使空间电荷区变窄
 - 扩散运动加强形成正向电流 $I = I_{\text{多子}} - I_{\text{少子}} \approx I_{\text{多子}}$
 - 内电场减弱→空间电荷区变窄→扩散电流 I 变大→导通
- 反向偏置，简称反偏
 - N区接正极，p区接负极
 - 内外电场同向
 - 外电场使多子背离PN结移动，空间电荷区变宽
 - 漂移运动加强形成反向电流 $I_R = I_{\text{少子}} \approx 0$
 - 内电场加强→空间电荷区变宽→少子漂移电流 $I_R \approx 0$ →截止
- 总结
 - 正偏导通，呈小电阻，电流较大
 - 反向截止，电阻很大，电流近似为零

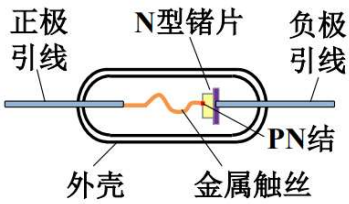
5.1.2 二极管的结构、伏安特性及参数

- 电路符号

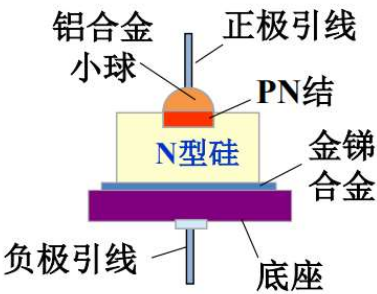


一、结构

- 点接触型



- 多为锗管，PN结面积小，不能通过大电流
- PN结两侧积累的正负电荷少，相当于C比较小的电容，即结电容小，能通过高频交流电
- 面接触型

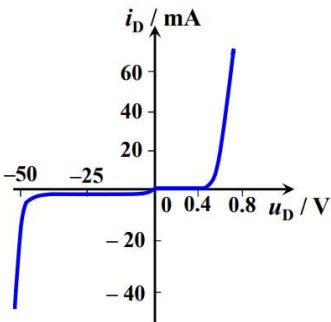


- 多为硅管，PN结面积大，能通过大电流，一般用于整流
- PN结两侧积累的正负电荷多，相当于C比较的大的电容，即结电容大，只能通过低频的交流电

二、伏安特性

二极管是非线性元件。

- 图例

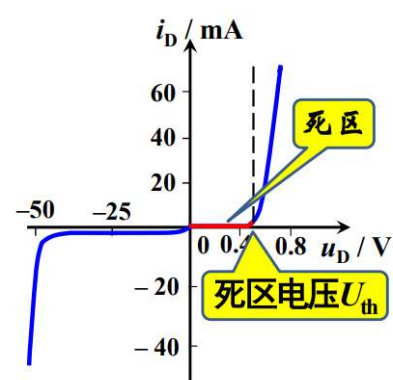


硅二极管2CP10的伏安特性

1. 正向特性

- 死区：当外加正向电压很低时，由于外电场还不能克服PN结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故正向电流很小几乎为零。

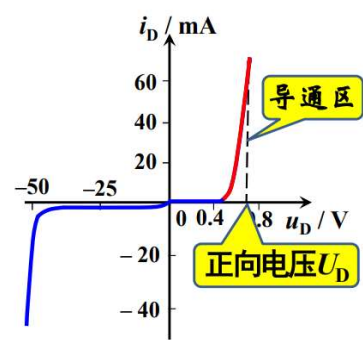
材料	死区电压 U_{th}
硅	约0.5V
锗	约0.2V



- 正向电压/导通电压/管压降：当外加正向电压超过死区电压时正向电流迅速增长，二极管进入 **正向导通区**，电压再继续增加时，电流迅速增大，而二极管端电压却几乎不变，此时二极管端电压称为 **正向电压**。

材料	正向电压
硅	0.6~0.7V (0.7V)
锗	0.1~0.3V (0.3V)

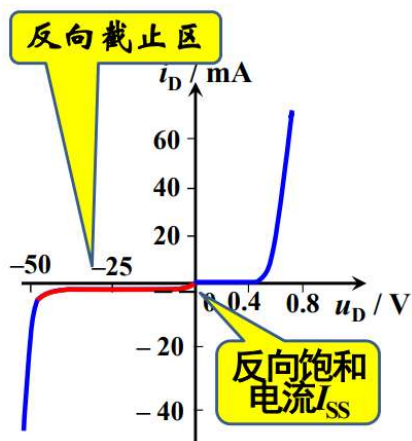
- 硅稳定性好,受温度影响小



2. 反向特性

- 反向饱和电流：在二极管两端加反向电压时，将有很小的、由少子漂移运动形成的反向饱和电流 (I_{SS}) 通过二极管。
 - 随温度的上升增长很快
 - 在反向电压不超过某一范围时，反向电流的大小基本恒定

材料	反向饱和电流
硅	1 μ A一下
锗	几十 μ A

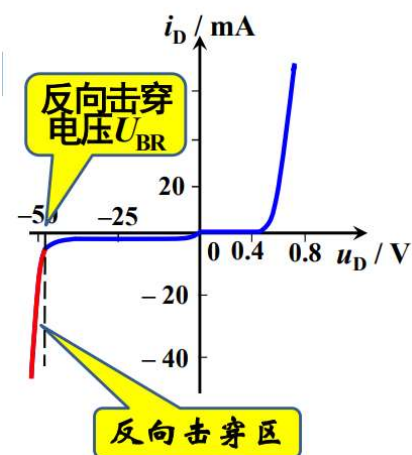


3. 电流方程

- $i_D = I_{SS}(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$
- 温度电压当量 $U_T = \frac{kT}{q}$
 - 常温 $t = 27^\circ\text{C}$, $U_T = 26\text{mV}$
- 正向偏置: $i_D \approx I_{SS}e^{\frac{u_D}{U_T}}$
- 反向偏置: $i_D \approx I_{SS}$
- 温度上升 → 电压不变时电流增大 → 正向特性曲线左移
- 温度上升 → 反向饱和电流增加 → 反向特性曲线下移
- 温度影响电流的实质是加快了载流子的运动, 反向特性受温度影响更大

4. 击穿特性

- 反向击穿: 外加反向电压超过**反向击穿电压** U_{BR} 时, 反向电流突然增大, 二极管失去单向导电性, 进入**反向击穿区**。
 - 电击穿(可逆)
 - 雪崩击穿: 掺杂浓度低, 空间电荷区宽; 反向电压大时, 载流子获得大动能撞击价电子, 产生了更多的自由电子-空穴对
 - 齐纳击穿: 掺杂浓度高, 空间电荷区窄, 不大的反向电压就能拉出价电子形成载流子
 - 热击穿
 - 电流过大或温度过高, 性能不能恢复



三、二极管的主要参数

- 最大整流电流 I_{FM}
 - 二极管长期使用时, 允许流过的最大正向平均电流。
- 反向峰值电压 U_{RWM}
 - 是保证二极管不被击穿而规定的最大反向工作电压, 一般是 U_{BR} 的一半或三分之二。
- 反向电流 I_R
 - 指二极管外加规定工作电压时的反向电流。

- 最高工作频率 f_M
 - 决定于PN结电容的大小，超过时单向导电性能变得较差。

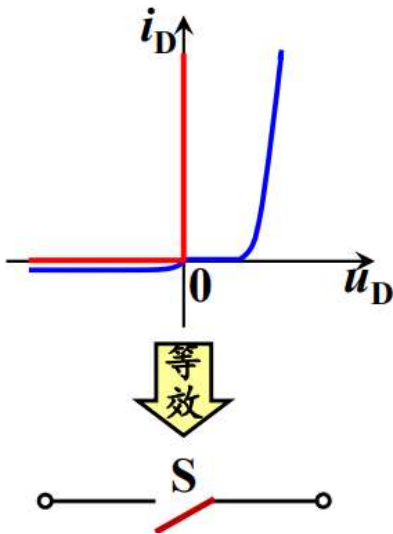
5.1.3 二极管电路模型及电路分析

一、二极管的电路模型

- 将指数模型 $i_D = I_{SS}(e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$ 分段线性化，得到二极管伏安特性的等效模型。

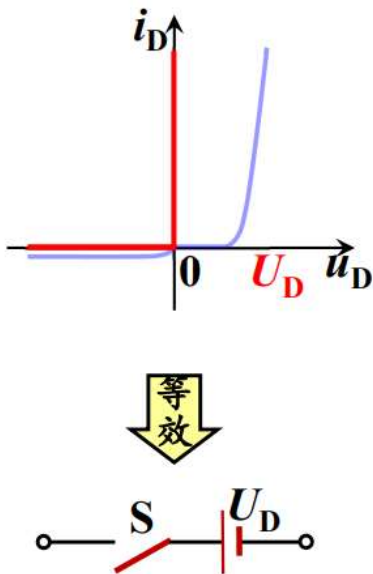
1. 理想模型

- 正向：管压降为0，电阻为0
- 反向：电阻为无穷大，电流为0

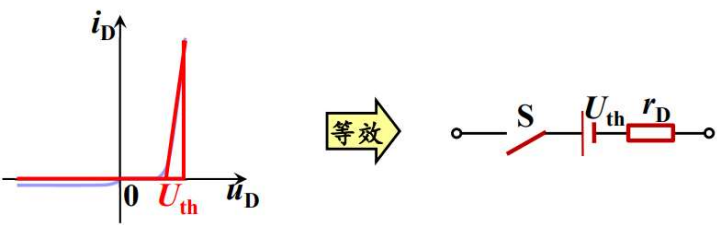


2. 恒压降模型

- $u_D > U_D$ ：二极管导通,电阻为0
- $u_D < U_D$ ：二极管截止,电流为0



3. 折线模型



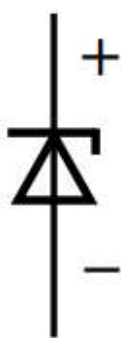
二、二极管的电路分析

- 先定性后定量
- 定性分析；判断二极管的工作状态（导通/截止）
- 一般分析方法和步骤
 - 定性分析
 1. 将二极管断开
 2. 分析二极管阴阳两极接入点的点位大小或表达式
 3. 根据所选择的电路模型确定二极管的状态
 - 定量分析
 - 由二极管的状态求解输出电压或电流

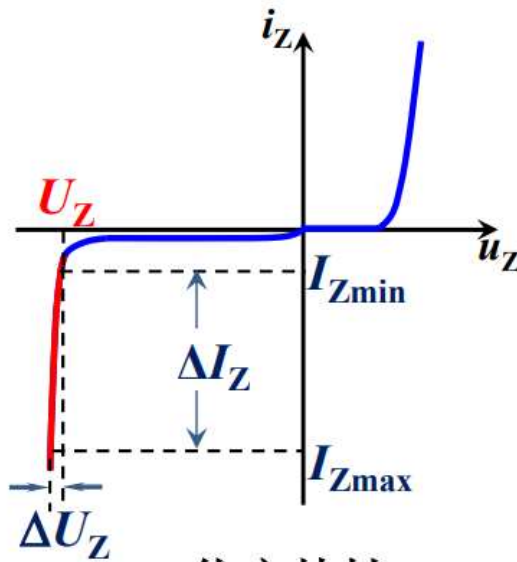
5.1.4 稳压二极管

一、特性和符号

- 稳压二极管一般为硅材料面接触型
- 符号



- 伏安特性

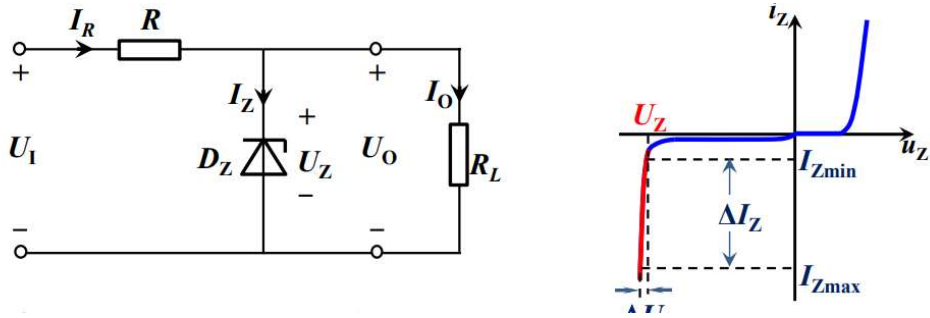


二、主要参数

- 1. 稳定电压 U_Z : 稳压管正常工作（反向击穿）时，稳压管两端的电压。
- 2. 稳定电流 $I_Z(I_{Zmin} \sim I_{Zmax})$: 稳压管正常工作时的参考电流。
- 3. 最大允许耗散功率 P_{ZM} : 稳压管不发生热击穿的最大功率损耗
- 4. 动态电阻 r_Z : $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ ，越小稳压效果越好。
- 5. 温度系数 α_Z : 反应稳压电压值受温度影响的参数。

三、应用电路分析

- 稳压管的动态稳压分析

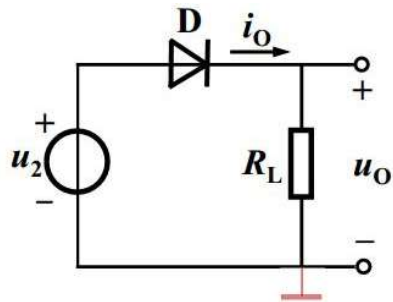


- 若 U_I 波动, R_L 不变:
 - U_I 升高, 于是 $U_O(U_Z)$ 升高, 导致 I_Z 增大, I_R 也增大, U_R 就会升高, 导致了 U_O 下降
- 若 R_L 减小, U_I 不变:
 - R_L 减小造成 $U_O(U_Z)$ 降低, 于是 I_Z 减小, I_R 也减小, U_R 就会降低, 导致了 U_O 升高
- 多个稳压管的串并联分析
 - 两稳压管同向串联且都截止时, 输出电压为两稳压值之和
 - 两稳压管异向串联且一个导通一个截止时, 输出电压为两稳压值之差
 - 两稳压管同向并联截止时, 输出电压为两稳压值中较小的一个
 - 两稳压管异向异向并联且一个导通一个截止时, 输出电压为导通电压0.7V

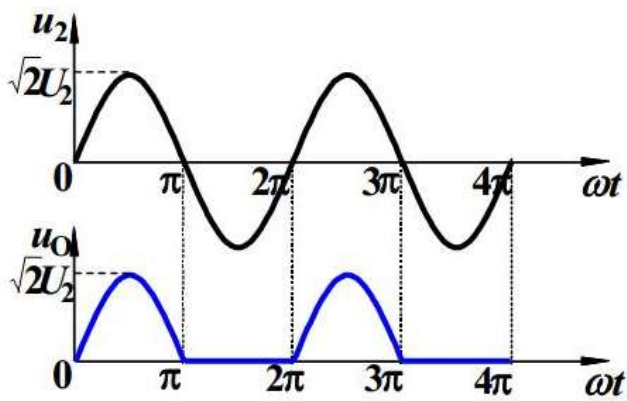
5.2~5.4 常见的二极管应用电路

1. 半波整流电路

- 电路图



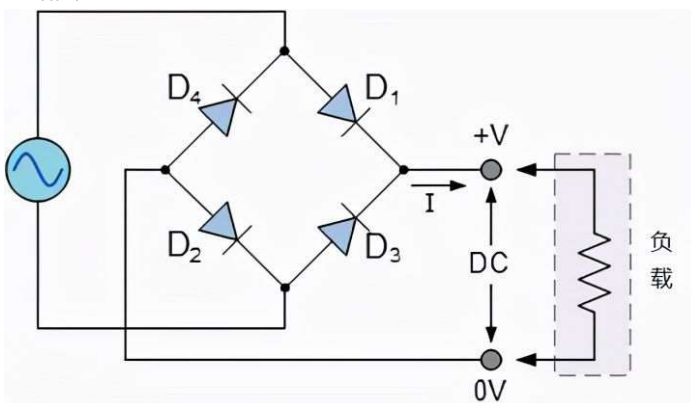
- 输出波形



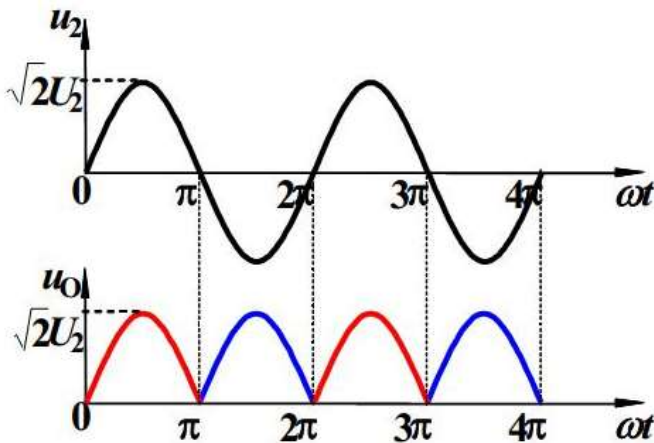
- 输出电压平均值
 - $U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0.45U_2$

2. 桥式整流

- 电路图



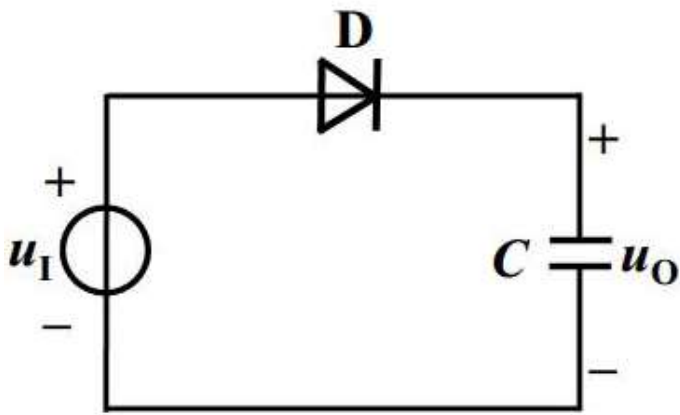
- 输出波形



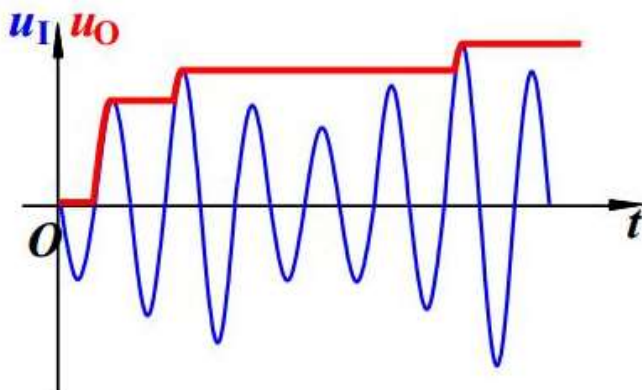
- 输出电压平均值
 - $U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin(\omega t) d(\omega t) \approx 0.45U_2$
- 二极管的整流电流
 - $I_{D1} = \frac{1}{2} I_o \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$
- 二极管承受的最高反向电压
 - $\sqrt{2}U_2$

3. 二极管峰值采样电路

- 电路图



- 输出波形



- 原理解释

- 每当输入电压出现新的峰值，二极管正向导通，输入电压通过导通的二极管向电容器充电，使之捕捉到输入电压的峰值，将峰值电压储存在电容器中输出。

4. 二极管检波电路

- 不做要求

第六章 晶体管放大电路基础

- 在本章中使用的 \dot{I} 和 \dot{U} 多为相量

6.1 放大电路的基本概念

一、放大的概念

- 放大电路实际上是一种功能模块电路，通过输入端口接收需要放大的信号，通过输出端口将放大后的信号送往负载
 - 把微弱的电信号放大到负载需要的值
- 放大的对象：**变化量**
- 放大的基本要求：不失真
- 放大的本质：将直流电源能量转换为信号能量输出，实现 **能量的控制和转换**。

二、放大电路的主要性能指标

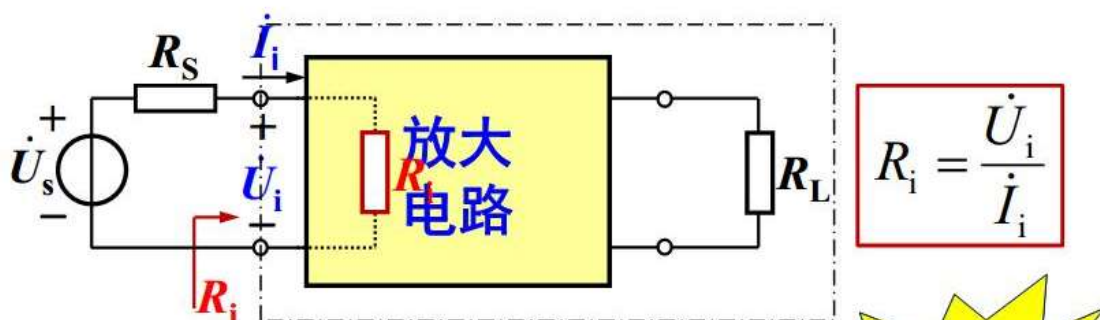
- 电路图



1. 放大倍数/增益 A

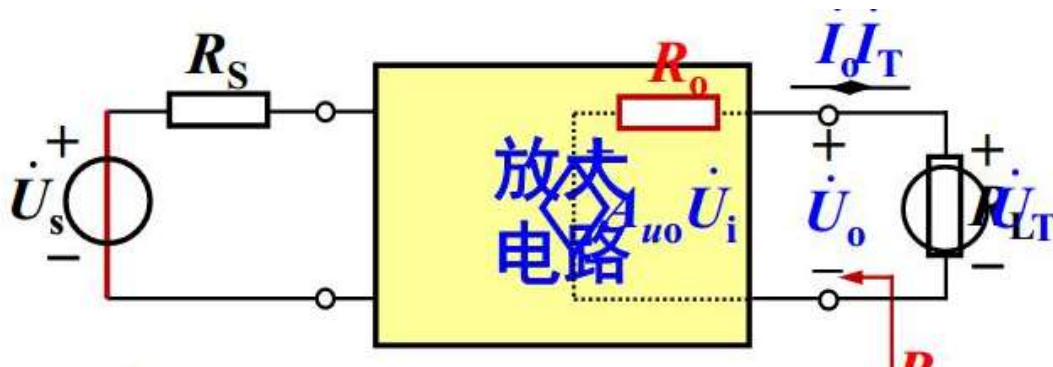
- 用于衡量放大电路的放大能力
- 电压增益
 - $A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ or $A_u = 20 \lg \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right|$ (dB)
- 电流增益
 - $A_i = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i}$
- 互阻增益
 - $A_r = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i}$
- 互导增益
 - $A_g = \frac{\dot{I}_o}{\dot{U}_i}$

2. 输入电阻 R_i



- 衡量放大电路从信号源获取信号的能力
- 信号拾取能力
- 一般来说，电压放大时， R_i 越大越好
 - R_i 越大， I_i 就越小，从信号源索取的电流就越小
 - 当信号源有内阻时， R_i 越大， U_i 就越接近 U_s

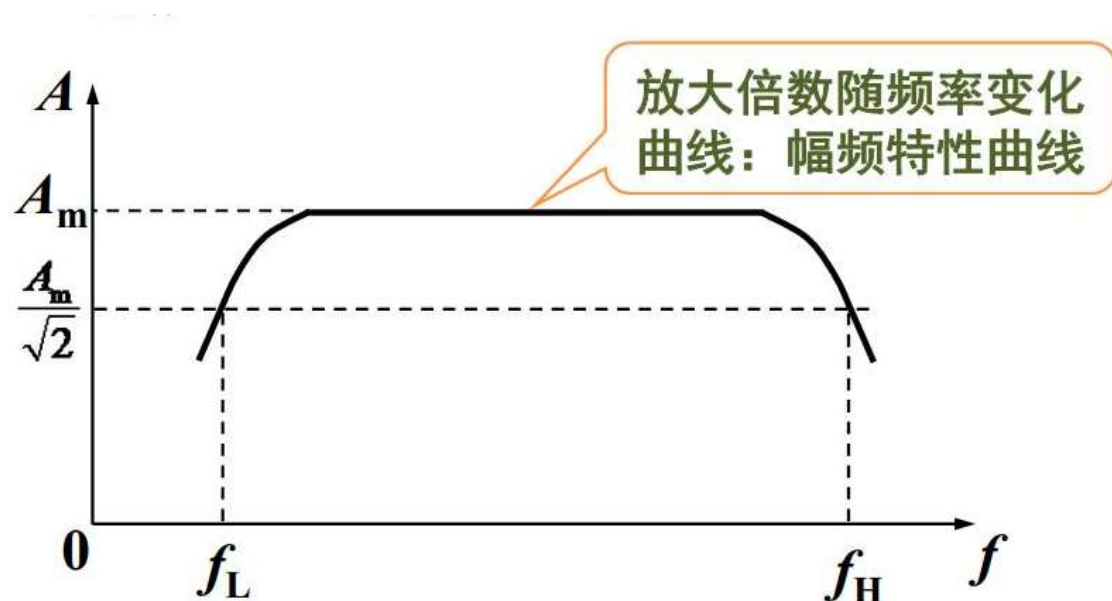
3. 输出电阻 R_o



$$R_o = \left. \frac{\dot{U}_T}{\dot{I}_T} \right|_{\dot{U}_s=0}$$

- 通常使用戴维南加压法求得 R_o
- 衡量放大电路带负载的能力
- **带负载能力**
- 一般来说，电压放大时， R_o 越小越好
 - R_o 越小，输出电压 U_o 越大，负载获取信号的比值越高

4. 通带频 f_{BW}



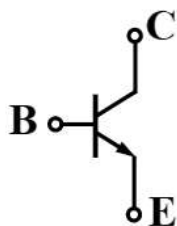
- 通带频 $f_{BW}=f_H-f_L$

6.2 双极结型晶体管

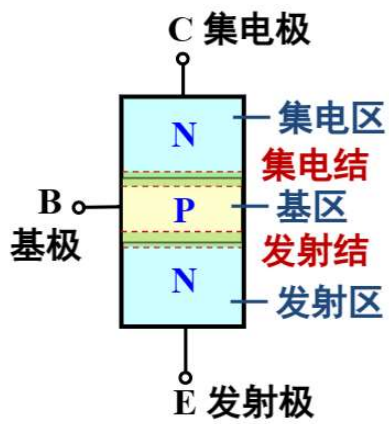
- 双极结型晶体管(Bipolar Junction Transistor, BJT)
 - 按材料分类：硅管和锗管
 - 按功率分类：小、中、大功率管

一、晶体管的基本结构

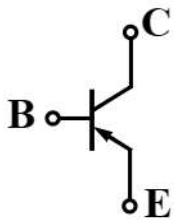
- 三个区、三个极、**两个结**
- NPN型
 - 电路符号



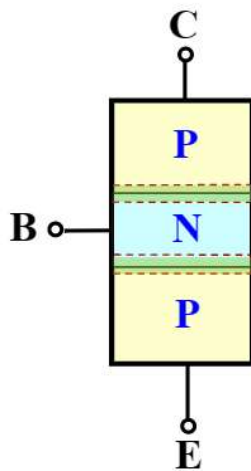
- 原理图



- PNP型
 - 电路符号



- 原理图

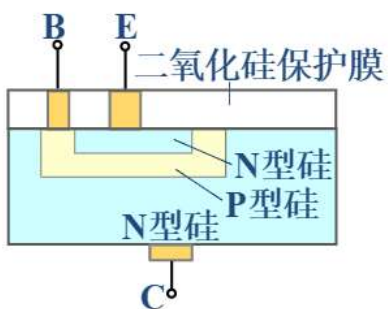


二、晶体管的 电流放大 原理

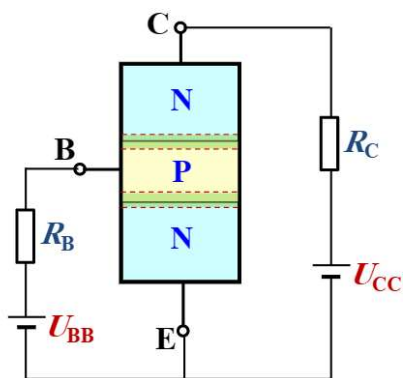
- 三极管不能被看作两个阳极相接并联的二极管

1. 放大条件

- NPN工艺示意图



- 内部条件
 - 集电区：面积大
 - 基区：薄且掺杂浓度较低
 - 发射区：掺杂浓度高
- 外部条件



• 发射结正偏、集电极反偏

- 正偏：P区电压高于N区电压
- 反偏：N区电压高于P区电压

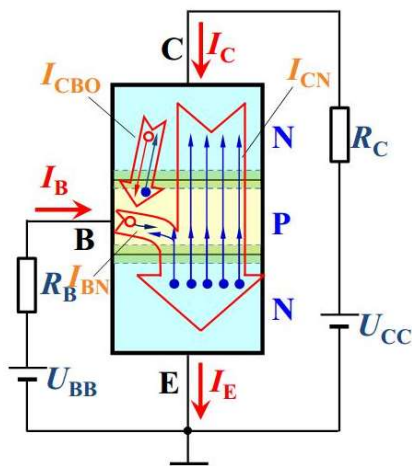
• 从电位的角度看：

	NPN管	PNP管
发射结正偏	$V_B > V_E$	$V_B < V_E$
集电结反偏	$V_C > V_B$	$V_C < V_B$

• 解题归纳

- 已知工作在放大状态的三极管黑箱的引脚电位，试确定类型、材料、三个电极
 1. 三脚中的中间电位为基极
 2. 与基极相差0.3V或0.7V的引脚是发射极，另一个为集电极
 3. 硅材料压降0.7V，锗材料压降0.3V
 4. NPN型集电极电位最高，PNP型发射极电位最高

2. 晶体管内部载流子的传输规律



1. 发射区向基区注入多子电子，形成发射极电流 I_E ，基区空穴运动因浓度低而忽略。
2. 电子到达基区后，少数与空穴复合，形成 I_{BN} ，多数向集电区漂移形成 I_{CN} 。基极空穴来源 $\left\{ \begin{array}{l} \text{基极电流提供 } I_B \\ \text{集电区少子漂移 } I_{CBO} \end{array} \right.$
3. 集电区扩散过来的载流子形成集电极电流 I_C 。

3. 晶体管的电流分配关系

- 载流子电流和电路电流的关系：

$$\begin{cases} I_E = I_{CN} + I_{BN} \\ I_B = I_{BN} - I_{CBO} \implies I_E = I_B + I_C \\ I_C = I_{CN} + I_{CBO} \end{cases}$$
- I_E 在B极和C极之间的分配比例主要取决于晶体管的内部工艺。
- 定义共发射极电流放大系数：直流： $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$ 交流： $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$

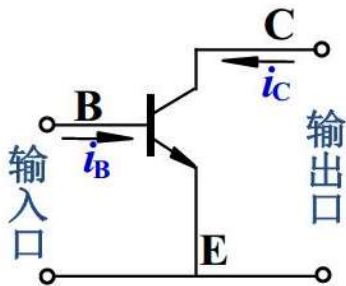
总结

- 把基极电流的微小变化能够引起集电极电流较大变化的特性称为**晶体管的电流放大作用**。
 - 小电流“撬动”大电流
- 电流放大系数只与管子的结构和掺杂浓度有关，与外加的电压无关。

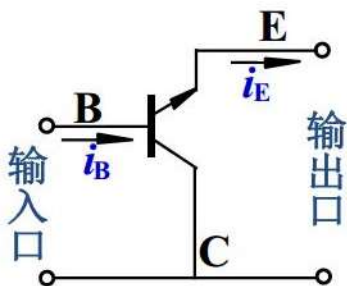
晶体管的特性曲线

组态

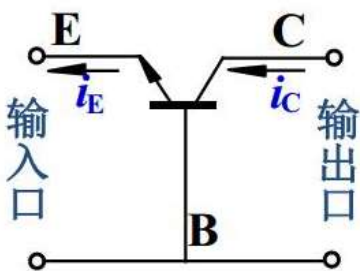
- 仅对于交流电路
- 共发射极



- 共集电极

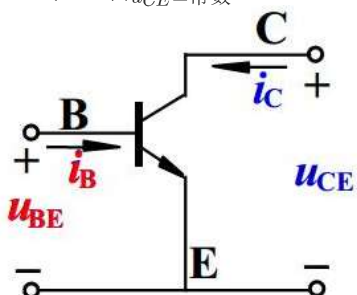


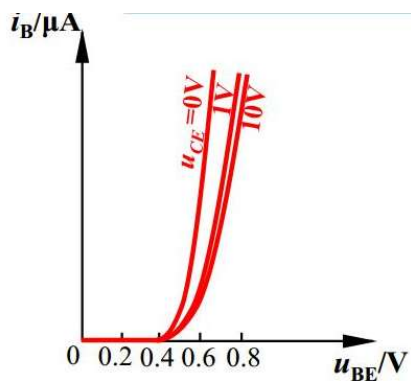
- 共基极



1. 输入特性曲线

- 类似与二极管正向特性
- $$i_B = f(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$$

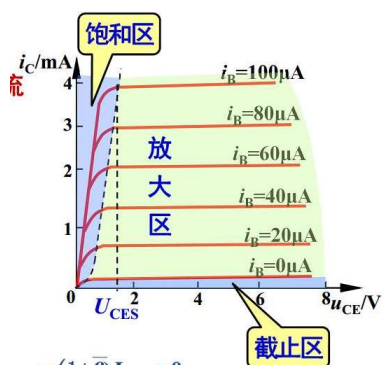
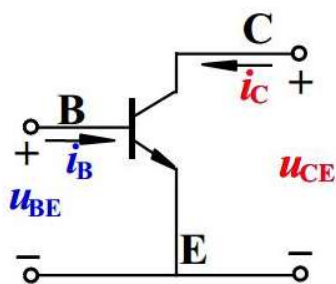




- $U_{CE} < 1V$, 发射结集电结都反偏, $U_{CE} > 1V$ 后, 集电结正偏, 压降稳定。总体来说, U_{CE} 对 U_{BE} 影响较小
- 导通电压 U_{BE}
 - 硅0.7V
 - 锗0.3V

2. 输出特性曲线

- $i_C = f(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$



- 放大区/线性区
 - $i_C = \beta i_B$, 电流控制电流
 - 条件: 发射结正偏、集电结反偏
- 饱和区
 - 收集不足, $i_c < \beta i_B$
 - 条件: 发射结正偏, 集电结正偏
- 截止区
 - $i_B = 0$, 基极开路, $i_C = I_{CEO} = (1 + \bar{\beta})I_{CBO} \approx 0$
 - 条件: 发射结反偏, 集电结反偏
- 饱和压降 U_{CES} : 饱和区与放大区交界处对应的电压

解题归纳

- 已知三极管类型、引脚电压, 分析三极管的材料和工作状态
 - 硅管/锗管, 放大、饱和、截止、损坏、倒置 (发射结反偏, 集电结正偏)
- 1. 发射结压降0.3V为锗管, 压降0.7V为硅管, 正偏超过为损坏, 发射结开路
- 2. 判断集电结状态

	发射结	集电结
饱和	正偏	正偏
放大	正偏	反偏
截止	反偏	反偏
倒置	反偏	正偏

四、晶体管的主要参数

1. 共发射极电流放大系数

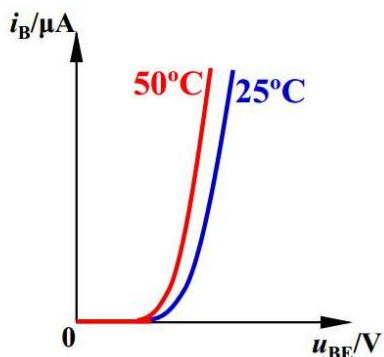
- 直流: $h_{FE}, \bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$
- 交流: $h_{fe}, \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$

2. 极间反向电流

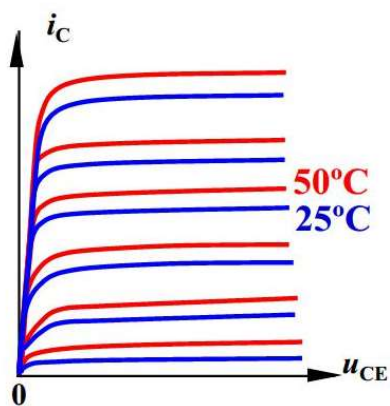
- 集-基极反向饱和电流 I_{CBO}
 - 发射极开路时, 由少子的漂移运动所形成的电流。
 - 温度升高, I_{CBO} 增加
- 集-射极穿透电流 I_{CEO}
 - 基极开路时。由集电区传过基区流向发射区的电流。
 - $I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$
 - 温度升高, I_{CEO} 增加

3. 极限参数

- 集电极最大允许电流 I_{CM}
 - 当 β 值下降到线性放大区 β 值的70%时, 所对应的集电极电流。
- 集-击穿电压 $U_{(BR)CEO}$
 - 下标BR表示击穿
 - 基极开路时, 集电极和发射极之间的最大允许电压。
- 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}
 - $P_{CM} = U_{CE} I_C$
 - 集电极电流通过集电结时不允许超过的集电极的最大功率。
- 温度对输入特性的影响



- 温度每升高1°C, U_{BE} 将减小(2~2.5)mV
- 温度升高输入特性曲线左移
- 温度对输出特性的影响

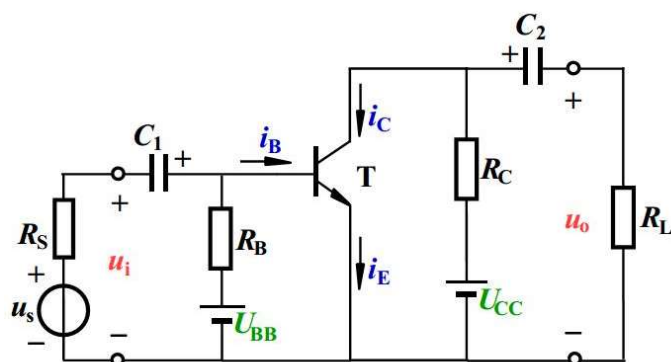


- 温度每升高1°C, β 增加0.5%~1.0%
- 温度升高输出特性曲线上移, 间距拉大

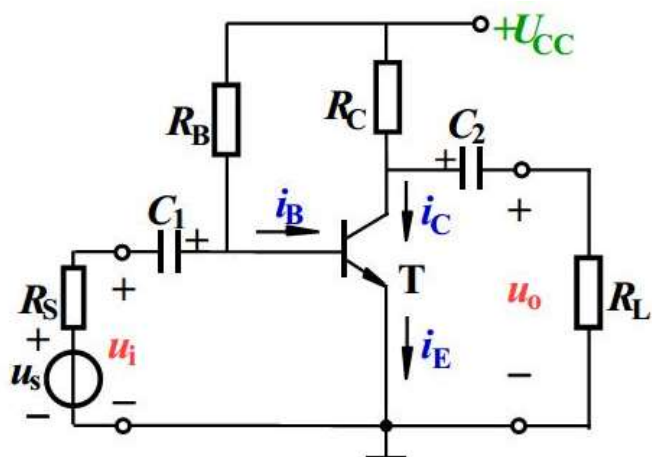
6.3.1 共发射极放大电路的组成及工作原理

一、共射放大电路的组成

- 放大电路



- 电源回路的简化

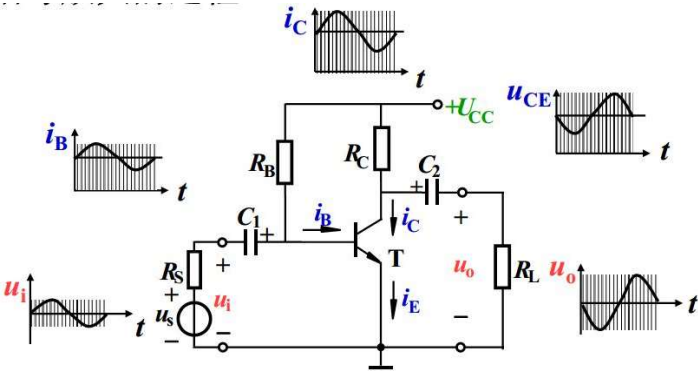


- R_B 的作用
 - 防止输入信号交流对地短路
 - 限流
- R_C 的作用
 - 防止输出信号交流对地短路
 - 限流
 - 使放大电流信号转变为放大电压信号
- 组成原则
 1. 能放大: 发射结正偏, 集电结反偏

- 2. 能传输: $U_i、U_o \neq 0$
- 3. 不失真: 与性能参数有关

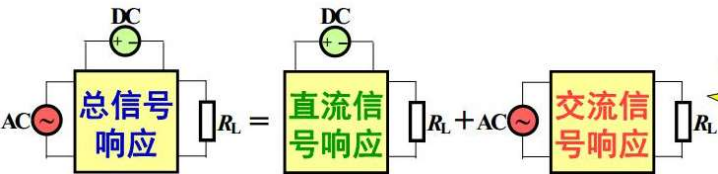
二、共射放大电路的工作原理

1. 信号放大过程



- $\Delta u_i \rightarrow \Delta u_{BE} \rightarrow \Delta i_B \rightarrow \Delta i_C \rightarrow \Delta u_{RC} \rightarrow \Delta u_{CE} \rightarrow \Delta u_o$
- i_B 由于直流信号的存在整体上移到坐标轴以上 u_o 由于电容的滤波去掉了直流信号下移到坐标轴

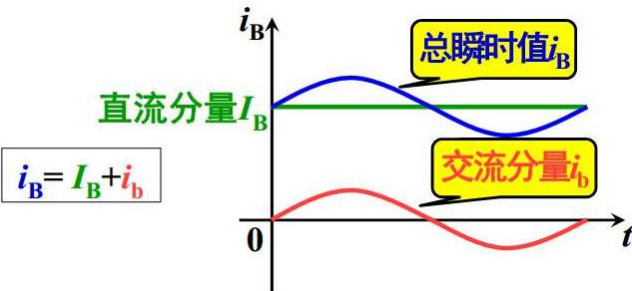
2. 重要理念



- 静态: 放大电路没有输入信号时电路中各点的电流和电压是直流信号, 称为静态, 即**直流信号响应**
- 动态: 放大电路有输入信号时, 电路中的电流和电压随交流信号而变化, 称为动态。即**总信号响应**
- 分析顺序: **先静态后动态**

3. 符号表示法

- I_B : 大写字母大写角标, 直流分量
- i_b : 小写字母小写角标, 交流分量
- i_B : 小写字母大写角标, 总量的瞬时值, 即直流分量和交流分量叠加的总和
- I_b : 大写字母小写角标, 交流量的有效值
- I_bm : 交流量的最大值



三、交流通路和直流通路

- 直流通路和交流通路的等效近似

	电容	电感	直流电压源	直流电流源	交流电压源	交流电流源
直流通路	开路	短路	不变	不变	短路	开路
交流通路	短路	开路	短路	开路	不变	不变

- 共射放大电路的直流通路
 - 交流电压源短路
 - 电容开路
 - 看导通情况
- 共射放大电路的交流通路
 - U_{CC} 对地短路/接地
 - 电容短路
 - 视为短路
- 转换后的电路图尽量不要有十字交叉