



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

第三章 双极型晶体管及其基本放大电路

lugh@ustc.edu.cn

2016年9月23日

本章主要内容

- § 3.1 双极型晶体管
- § 3.2 BJT基本放大电路及分析方法
- § 3.3 三种组态放大器的中频特性
- § 3.4 单级共发放大器的频率特性
- § 3.5 多级放大电路



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

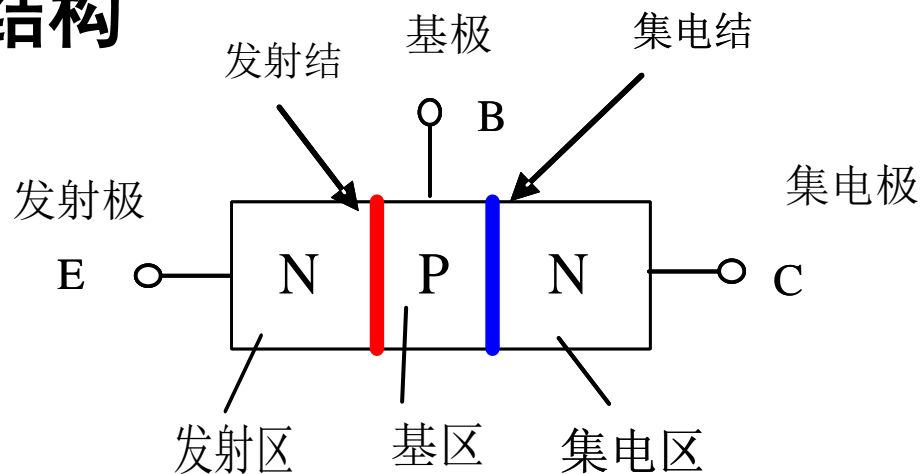
§ 3.1 双极型晶体管

lugh@ustc.edu.cn

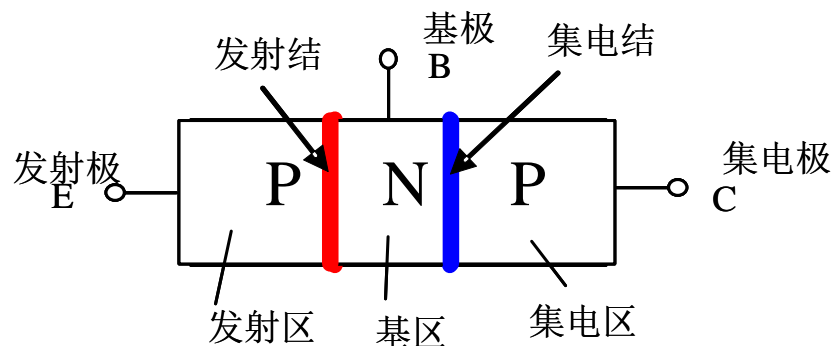
2016年9月23日

1.BJT的结构

■ 内部结构



NPN型晶体管



PNP型晶体管

1.BJT的结构

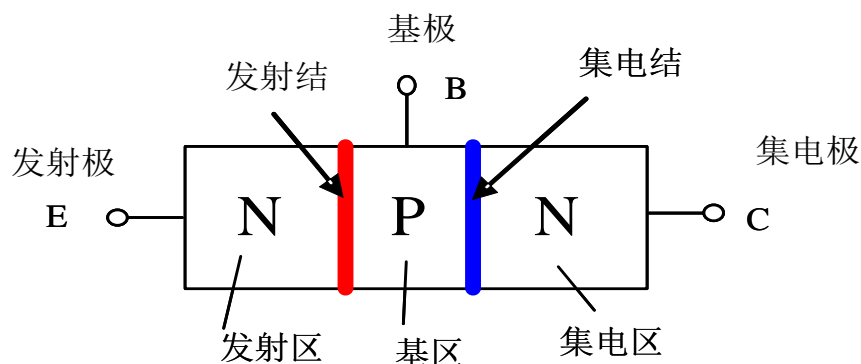
■ 两种类型

- NPN型晶体管
- PNP型晶体管
- 结构上的区别：各区采用的半导体材料极性相反

■ 结构要素

- 三区：发射区、基区、集电区
- 三极：发射极、基极、集电极
- 两结：发射结、集电结

1.BJT的结构

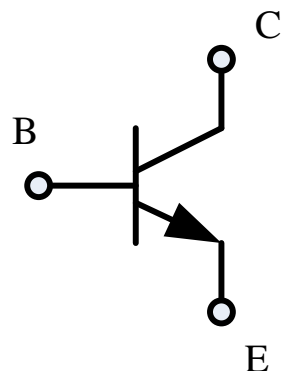


■ 注意

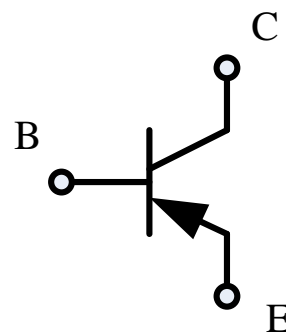
- 发射区高掺杂，多数载流子浓度大
- 集电区区域大，所以承受的功率也大
- 基区很薄，作为过渡区，其掺杂浓度最低

1.BJT的结构

■ 电路符号



NPN型晶体管



PNP型晶体管

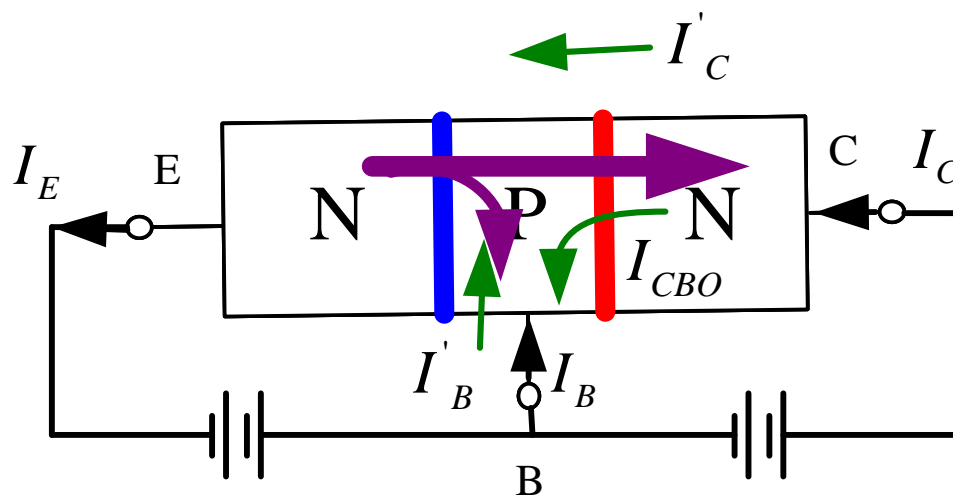
- 发射极的箭头可区分出发射极与集电极，其方向可区分**NPN**管和**PNP**管，箭头的方向表示发射结正偏方向，也是线性工作时的电流方向

2. 放大工作原理

■ 放大工作条件

- 发射结正向偏置，集电结反向偏置

■ 放大工作原理



2. 放大工作原理

■ 集电极电流

- 第一部分：发射区注入的自由电子是形成集电极电流的主要来源

$$I'_C = \bar{\alpha} I_E, 0.9 < \bar{\alpha} < 1$$

- $\bar{\alpha}$ 表示发射区能够到达集电区多子的比例，称为共基组态的直流电流放大系数

- 第二部分：由于集电结反偏，集电区和基区中少数载流子的漂移运动形成反向饱和电流 I_{CBO}

- 集电极总电流 $I_C = I'_C + I_{CBO} = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$

2. 放大工作原理

■ 基极电流

- 第一部分：发射区注入到基区的自由电子流中仅很小一部分与基区中的空穴复合，形成基极复合电流

$$I'_B = (1 - \bar{\alpha}) I_E$$

- 第二部分：集电极的反向饱和电流 I_{CBO}

- 基极总电流 $I_B = I'_B - I_{CBO} = (1 - \bar{\alpha}) I_E - I_{CBO}$

■ 发射极电流

$$I_E = I_B + I_C$$

2. 放大工作原理

- 考虑 I_{CBO}
- 得到两个基本的电流关系

$$\begin{cases} I_C = I_C' + I_{CBO} = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} \\ I_B = I_B' - I_{CBO} = (1 - \bar{\alpha}) I_E - I_{CBO} \end{cases}$$

- 另外

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_B + \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_{CBO} + I_{CBO} \\ &= \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \end{aligned}$$

2. 放大工作原理

- 忽略 I_{CBO} 时各极电流之间的关系

$$\begin{cases} I_C = \bar{\alpha} I_E \\ I_C = \bar{\beta} I_B \end{cases}$$

2. 放大工作原理

■ 几点说明

3. 数学模型

■ Ebers-Moll模型

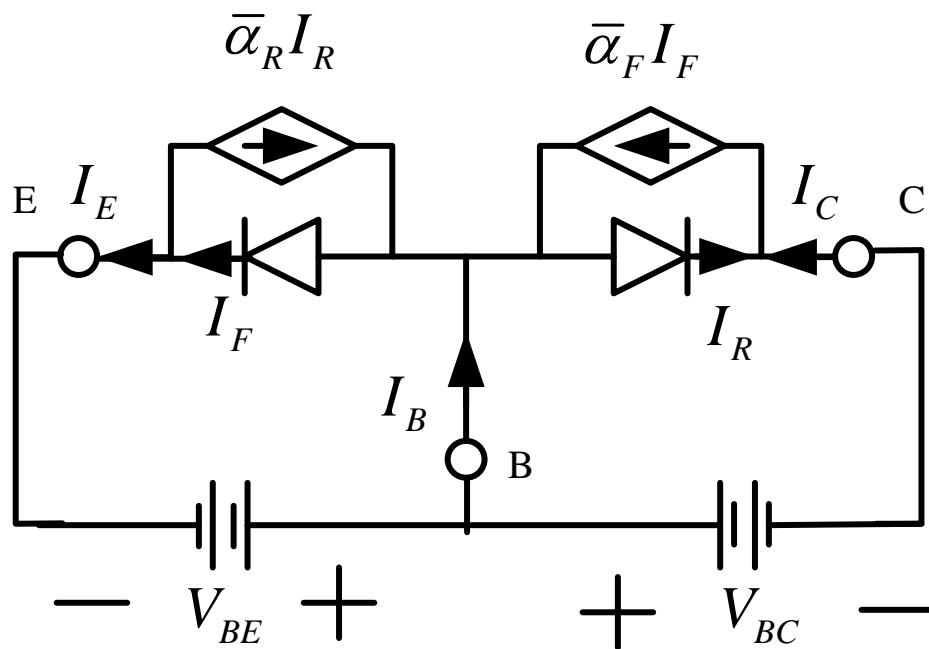
- BJT的理想模型或直流大信号分析模型

■ 基本思路

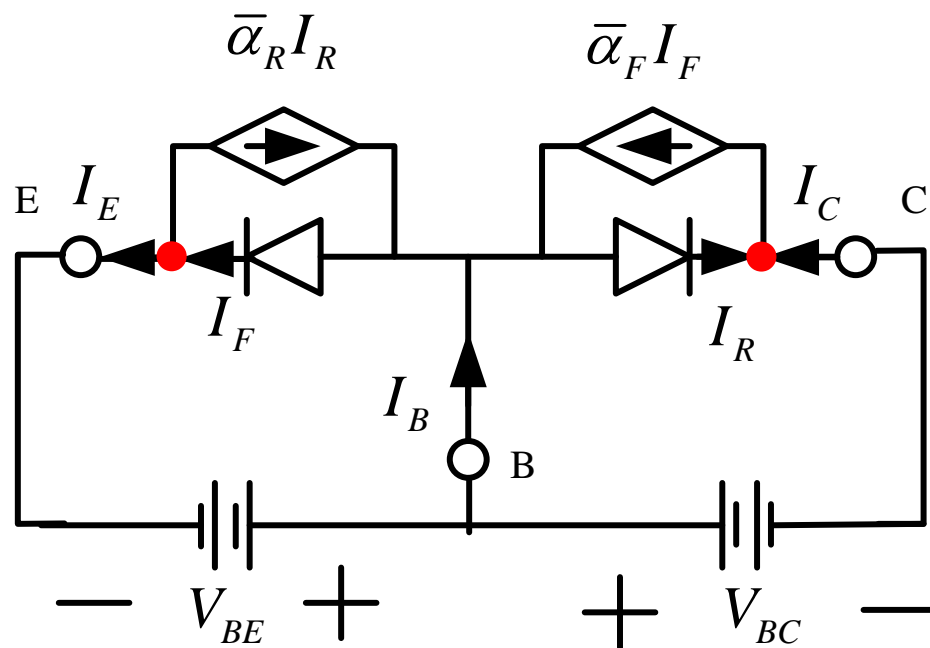
- 将发射结和集电结视作两个背靠背的**PN**结二极管，并采用受控电流源表达两者之间的相互影响，其中，受控电流反映了穿透基区的多子形成的电流

3. 数学模型

■ Ebers-Moll模型



3. 数学模型



二极管数学方程:

$$\begin{cases} I_F = I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) \\ I_R = I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \end{cases}$$

节点方程:

$$\begin{cases} I_E = I_F - \bar{\alpha}_R I_R \\ I_C = -I_R + \bar{\alpha}_F I_F \end{cases}$$

3. 数学模型

Ebers – Moll方程:

$$\begin{cases} I_E = I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - \bar{\alpha}_R I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \\ I_C = -I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) + \bar{\alpha}_F I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) \end{cases}$$

■ 说明

- 在**Ebers-Moll**模型中，晶体管的两个端电压 V_{BE} 和 V_{BC} 可正可负，故**Ebers-Moll**方程可以描述晶体管的所有工作状态

3. 数学模型

■ 放大状态

- 忽略反向饱和电流，则处于放大状态的晶体管，其发射结可近似为正向偏置的**PN**结二极管，而集电极电流受发射极电流的线性控制

$$\begin{cases} I_E = I_F + \bar{\alpha}_R I_{CS} \approx I_F \\ I_C = \bar{\alpha}_F I_F + I_{CS} \approx \bar{\alpha}_F I_F \end{cases}$$

3. 数学模型

■ 饱和状态

- 该方程无法进行线性简化，仍为非线性方程

$$\begin{cases} I_E = I_{ES} e^{V_{BE}/V_T} - \bar{\alpha}_R I_{CS} e^{V_{BC}/V_T} \\ I_C = -I_{CS} e^{V_{BC}/V_T} + \bar{\alpha}_F I_{ES} e^{V_{BE}/V_T} \end{cases}$$

■ 截止状态

- 忽略反向饱和电流，则处于截止状态的晶体管，发射极和集电极相当于开路

$$\begin{cases} I_E \approx -I_{ES} + \bar{\alpha}_R I_{CS} \approx 0 \\ I_C \approx I_{CS} - \bar{\alpha}_F I_{ES} \approx 0 \end{cases}$$

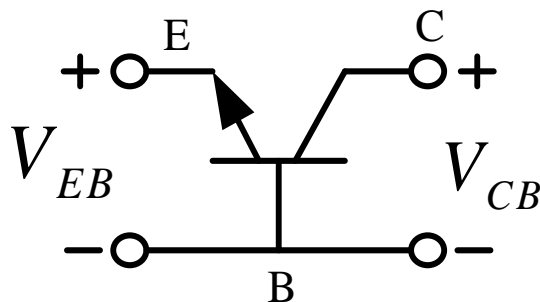
4. 伏安特性

- (1) 共基组态
- (2) 共发组态

(1) 共基组态

■ 共基组态

- 输入端口：发射极与基极构成
- 输出端口：集电极与基极构成

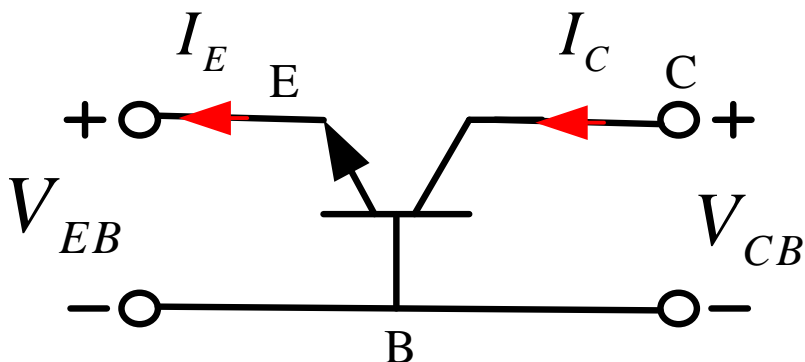


■ 与二极管伏安特性的比较

- 二极管：一个端口两个变量，一个自变量一个因变量
- 三极管：两个端口四个变量，两个自变量两个因变量

(1) 共基组态

■ 输入端伏安特性



$$I_E = f(V_{EB}, V_{CB}) \Big|_{V_{CB}=C}$$

■ 说明

- 根据 V_{CB} 的不同取值，输入端伏安特性曲线将以一组曲线族的形式存在

(1) 共基组态

$$I_E = I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - \bar{\alpha}_R I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right)$$

当 $V_{CB} = 0$ 时:

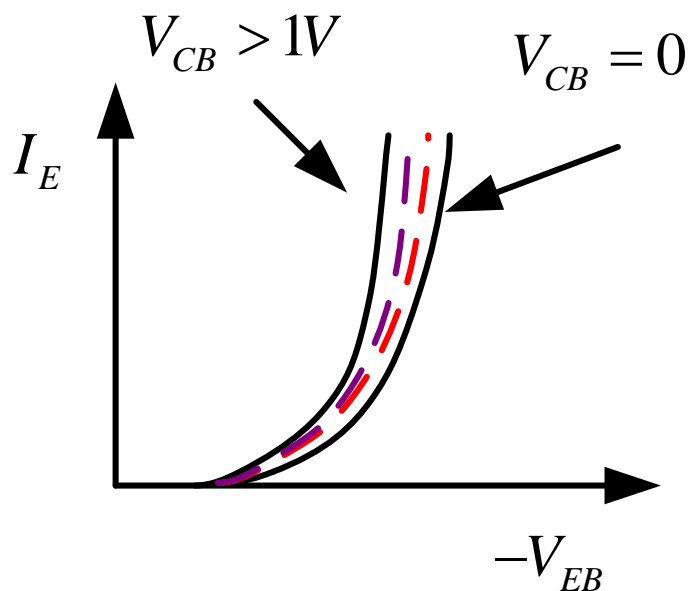
$$I_E = I_{ES} \left(e^{-V_{EB}/V_T} - 1 \right)$$

当 $V_{CB} > 1V$ 时:

$$I_E = I_{ES} \left(e^{-V_{EB}/V_T} - 1 \right) + \bar{\alpha}_R I_{CS}$$

(1) 共基组态

■ 伏安特性曲线

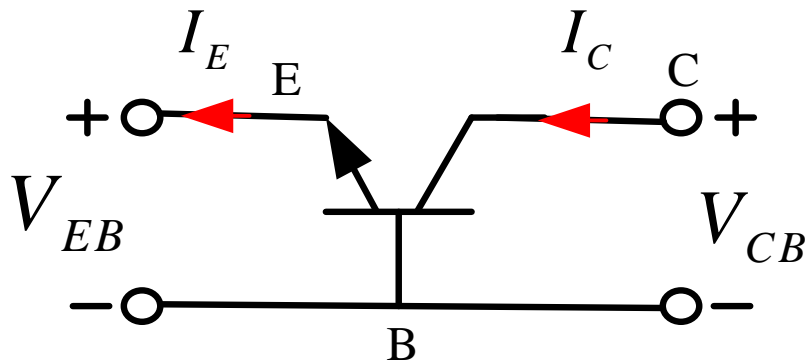


■ 说明

- 当 $V_{CB} > 1V$ 时，可近似认为输入端伏安特性曲线重合为一条曲线

(1) 共基组态

■ 输出端伏安特性



$$I_C = f(V_{EB}, V_{CB}) \Big|_{V_{EB}=C} = f(I_E, V_{CB}) \Big|_{I_E=C}$$

■ 说明

- 由于PN结正偏， V_{EB} 可调范围很小，曲线不明确，故采用发射极电流 I_E 来作为控制量
- 根据 I_E 的不同取值，输出端伏安特性曲线将以一组曲线族的形式存在

(1) 共基组态

现只有 I_C 和 V_{EB} 、 V_{CB} 的关系，以下推导 I_C 和 I_E 、 V_{CB} 的关系

由 $I_E = I_F - \alpha_R I_R$ 得 $I_F = I_E + \alpha_R I_R$

代入 I_C 的公式，得到

$$I_C = \alpha_F I_F - I_R = \alpha_F (I_E + \alpha_R I_R) - I_R = \alpha_F I_E - (1 - \alpha_F \alpha_R) I_R$$

(1) 共基组态

当 $V_{CB} \gg 26mV$ 时, $I_R = -I_{CS}$

$$I_C = \alpha_F I_E + (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS}$$

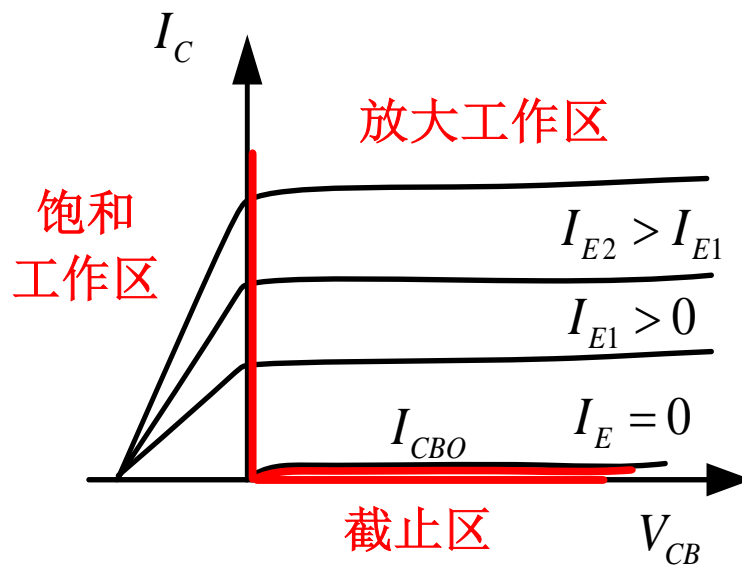
对比以前结果 $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$

得出 $(1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS} = I_{CBO}$

$$I_C = \alpha_F I_E - I_{CBO} (e^{-V_{CB}/V_T} - 1)$$

(1) 共基组态

■ 输出端伏安特性曲线



(1) 共基组态

■ 三种工作区的分割条件

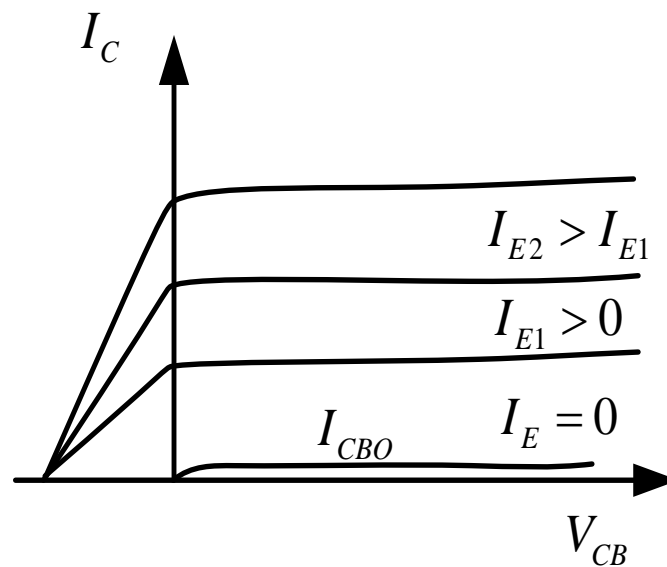
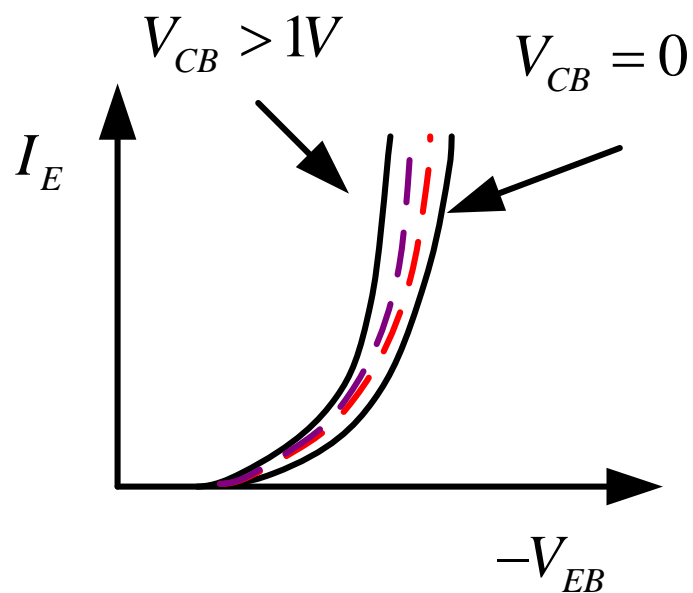
$$\text{放大区} \begin{cases} V_{CB} > 0 \\ I_E > 0 \end{cases}$$

$$\text{饱和区} \begin{cases} V_{CB} < 0 \\ I_E > 0 \end{cases}$$

$$\text{截止区} \begin{cases} I_C \approx 0 \\ I_E = 0 \end{cases}$$

(1) 共基组态

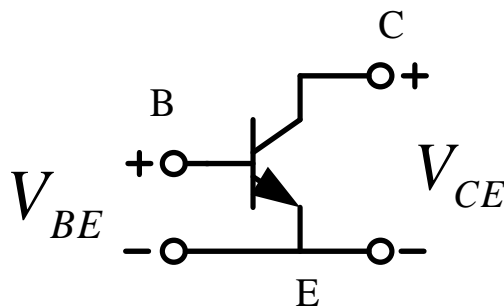
■ 伏安特性曲线



(2) 共发组态

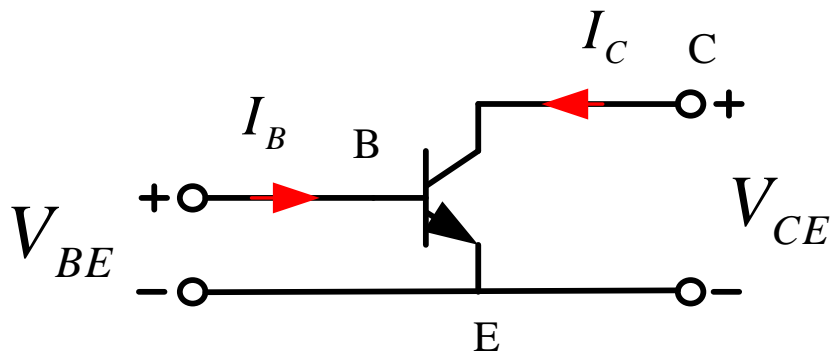
■ 共发组态

- 输入端口：基极与发射极构成
- 输出端口：集电极与发射极构成



(2) 共发组态

■ 输入端伏安特性



$$I_B = f(V_{BE}, V_{CE}) \Big|_{V_{CE}=C}$$

■ 说明

- 根据 V_{CE} 的不同取值，输入端伏安特性曲线将以一组曲线族的形式存在

(2) 共发组态

建立 I_B 与端电压 V_{BE} , V_{CE} 的关系式:

$$\begin{cases} I_B = I_E - I_C = (1 - \bar{\alpha}_F) I_F + (1 - \bar{\alpha}_R) I_R \\ = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS} (e^{V_{BC}/V_T} - 1) \\ V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \Rightarrow V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} \end{cases}$$

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS} (e^{\frac{V_{BE} - V_{CE}}{V_T}} - 1)$$

(2) 共发组态

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS} (e^{\frac{V_{BE} - V_{CE}}{V_T}} - 1)$$

当 $V_{CE} = 0V$ 时:

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS} (e^{V_{BE}/V_T} - 1)$$

(2) 共发组态

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS} (e^{\frac{V_{BE} - V_{CE}}{V_T}} - 1)$$

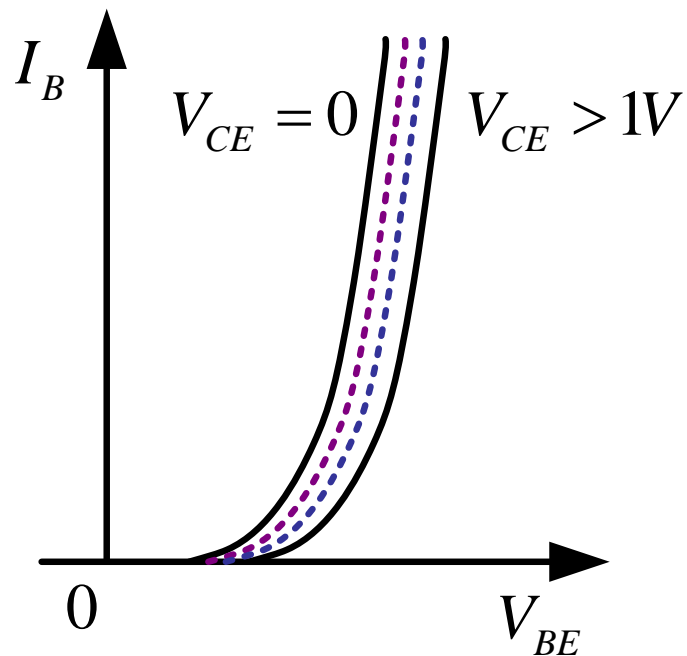
当 $V_{CE} > 1V$ 时:

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} (e^{V_{BE}/V_T} - 1) - (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS}$$

曲线右移

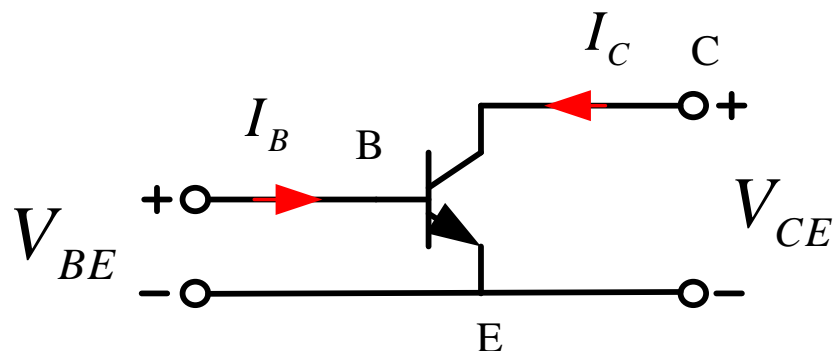
(2) 共发组态

■ 输入端伏安特性曲线



(2) 共发组态

■ 输出端伏安特性



$$I_C = f(V_{BE}, V_{CE}) \Big|_{V_{BE}=C} = f(I_B, V_{CE}) \Big|_{I_B=C}$$

(2) 共发组态

建立 I_C 与 I_B, V_{CE} 的关系式:

$$\begin{cases} I_C = -I_R + \bar{\alpha}_F I_F \\ I_B = I_E - I_C = (1 - \bar{\alpha}_F) I_F + (1 - \bar{\alpha}_R) I_R \end{cases}$$

$$\Rightarrow I_C = \bar{\alpha}_F \frac{I_B - (1 - \bar{\alpha}_R) I_R}{1 - \bar{\alpha}_F} - I_R = \frac{\bar{\alpha}_F}{1 - \bar{\alpha}_F} I_B - \frac{1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F}{1 - \bar{\alpha}_F} I_R$$

$$I_R = I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$I_C = \bar{\beta}_F I_B - \frac{1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F}{1 - \bar{\alpha}_F} I_{CS} \left(e^{(V_{BE} - V_{CE})/V_T} - 1 \right)$$

$$= \bar{\beta}_F I_B - (1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO} \left(e^{(V_{BE} - V_{CE})/V_T} - 1 \right)$$

(2) 共发组态

当 $I_B=0$ 时,

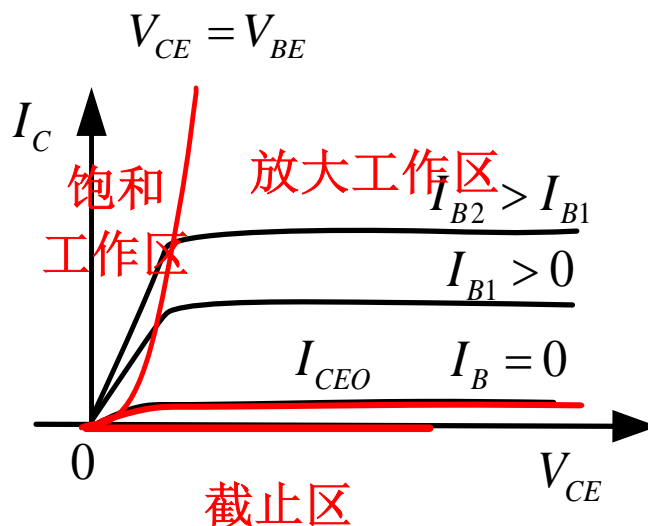
$$I_C = -(1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO} \left(e^{(-V_{CE})/V_T} - 1 \right)$$

当 $I_B=I_{B1}$ 时,

$$I_C = \bar{\beta}_F I_{B1} - I_{CEO} \left(e^{(V_{BE}-V_{CE})/V_T} - 1 \right)$$

(2) 共发组态

■ 输出端伏安特性曲线



(2) 共发组态

■ 三种工作区的分割条件

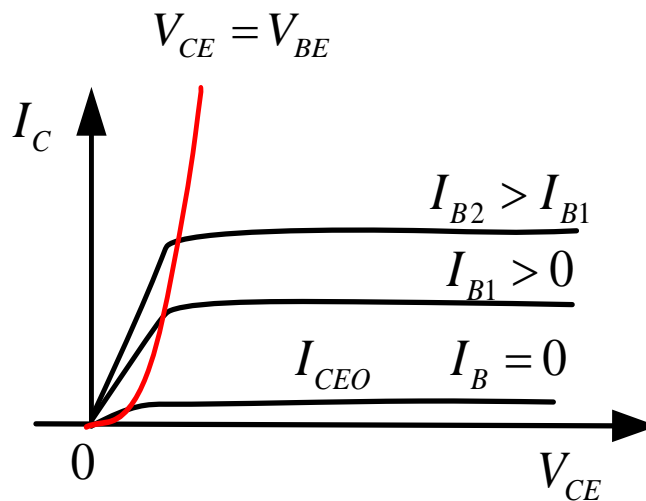
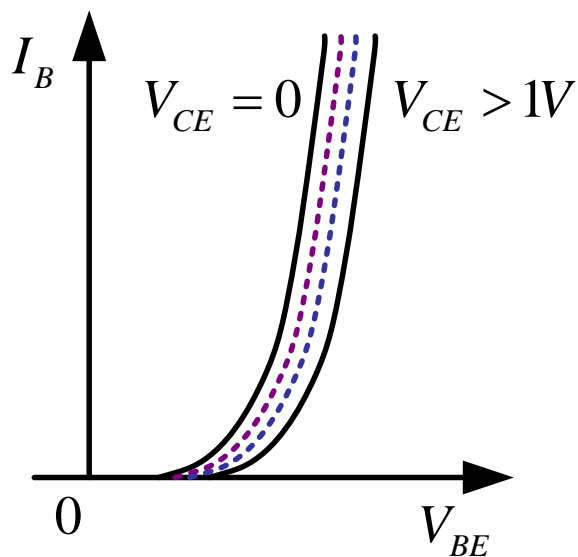
$$\text{放大区} \begin{cases} I_B > 0 \\ V_{CE} > V_{BE} \end{cases}$$

$$\text{截止区} \begin{cases} I_B = 0 \\ I_C \approx 0 \end{cases}$$

$$\text{饱和区} \begin{cases} I_B > 0 \\ V_{CE} < V_{BE} \end{cases}$$

(2) 共发组态

■ 伏安特性曲线



5. 主要参数

- (1) 电流放大系数
- (2) 反向饱和电流
- (3) 极限参数
- (4) 频率参数
- (5) 结电容与体电阻

(1) 电流放大系数

■ 电流放大系数

$$\alpha \left\{ \begin{array}{l} \bar{\alpha} = \frac{I_C - I_{cbo}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E}, \text{ 直流} \\ \alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \Big|_Q = \frac{i_C}{i_E}, \text{ 交流定义} \end{array} \right.$$

(1) 电流放大系数

$$\beta \begin{cases} \bar{\beta} = \frac{I_C - I_{ceo}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}, \text{ 直流} \\ \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_Q = \frac{i_C}{i_B}, \text{ 交流定义} \end{cases}$$

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

□ 以后交直流可以混用，不加区别

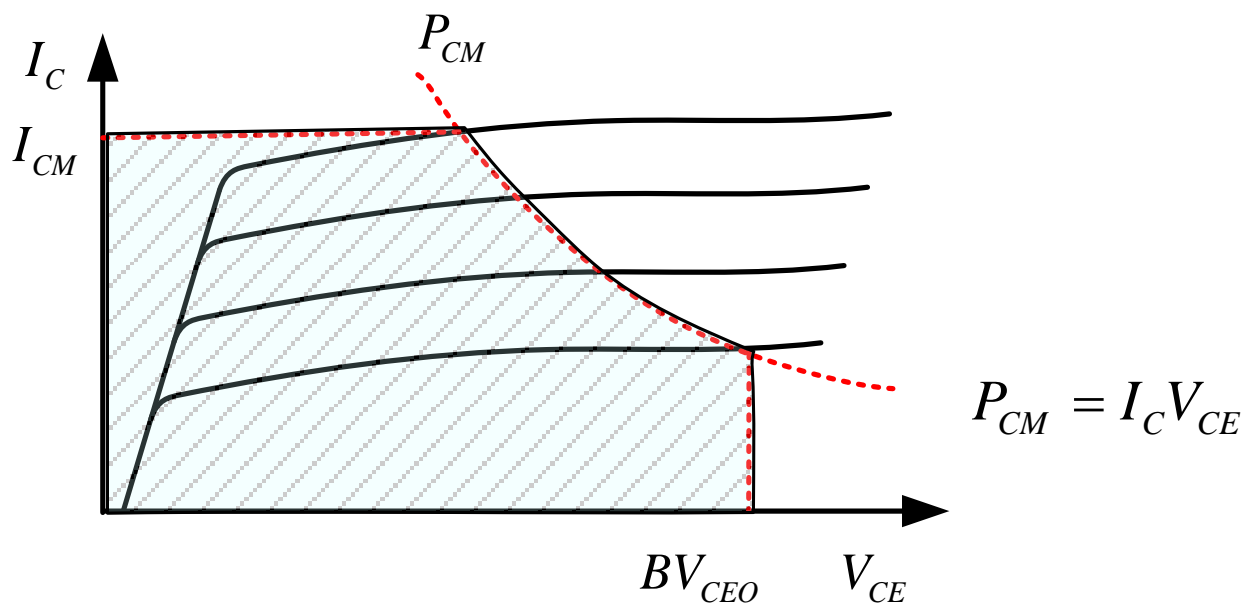
(2) 反向饱和电流

- 本征激发产生的少数载流子，受温度影响严重
- 一般不予考虑

(3) 极限参数

■ 极限参数

- 极限参数是指晶体管能够正常使用时的最大的电压，电流和功率值



(3) 极限参数

■ 耗散功率 P_{CM}

- 也即集电极最大允许耗散功率，是指晶体管参数变化不超过规定允许值时的最大集电极耗散功率

■ 说明

- 晶体管在使用时，其实际功耗不允许超过 P_{CM} 值，否则会造成晶体管因过载而损坏
- 耗散功率可作为区分小功率晶体管、中功率晶体管、大功率晶体管的指标

(3) 极限参数

■ 集电极最大电流 I_{CM}

- 集电极最大电流是指晶体管集电极所允许通过的最大电流

■ 说明

- 当晶体管的集电极电流超过 I_{CM} 时，晶体管的 β 值等参数将发生明显变化，影响其正常工作，甚至还会损坏

(3) 极限参数

■ 最大反向电压

- 最大反向电压是指晶体管在工作时所允许施加的最高工作电压
- 包括集电极-发射极反向击穿电压、集电极-基极反向击穿电压和发射极-基极反向击穿电压

■ 集电极-发射极反向击穿电压

- 该电压是指当晶体管基极开路时，其集电极与发射极之间的最大允许反向电压，一般用 BV_{CEO} 表示

(4) 频率参数

■ 频率特性

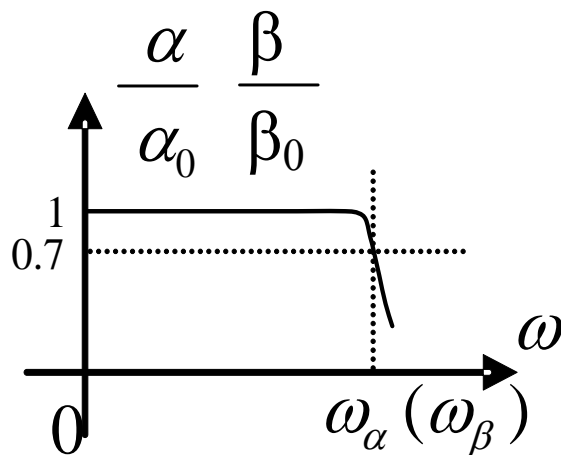
- 由于结电容的存在，晶体管的电流放大系数与工作频率有关，电流放大系数是频率的函数

$$\alpha(j\omega), \beta(j\omega)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\alpha}}$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_\beta}}$$

(4) 频率参数



□ 定义几个参数

■ 低频时，共基、共发电流放大倍数

$$\alpha_0, \beta_0$$

(4) 频率参数

■ 共基截止频率

$$\alpha(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_\alpha}} \Rightarrow |\alpha(j\omega_\alpha)| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{2}}$$

(4) 频率参数

■ 共发截止频率 ω_β

$$\beta(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_\beta}} \Rightarrow |\beta(j\omega_\beta)| = \frac{\beta_0}{\sqrt{2}}$$

$$\beta(j\omega) = \frac{\alpha(j\omega)}{1 - \alpha(j\omega)} \Rightarrow \omega_\alpha = (1 + \beta_0) \omega_\beta$$

(4) 频率参数

■ 特征频率 ω_T

- 晶体管的特征频率即 β 值降为1时晶体管的工作频率，此时晶体管失去电流放大能力时的频率，一般用 ω_T 表示

$$\text{由 } |\beta(j\omega_T)| = 1, \text{ 得 } \omega_T = \beta_0 \omega_\beta$$

(5) 结电容与体电阻

■ 结电容

□ 扩散电容 C_e 和势垒电容 C_c

■ 前者为发射结电容，后者为集电结电容，大小关系？

■ 基区体电阻 r_b

□ 基区体电阻是反映了基区宽度、掺杂浓度的参数，并反映了基区复合电流的大小，用 r_b 表示，一般在百欧量级