



第三章 双极型晶体管及其 基本放大电路

郭圆月

2022年10月25日





本章主要内容

3.1 双极型晶体管

3.2 BJT基本放大电路直流分析方法

3.3 BJT基本放大电路交流分析方法

3.4 三种组态放大器的中频特性

3.5 单级共发射放大器的频率特性

3.6 多级放大电路





§ 3.1 双极型晶体管

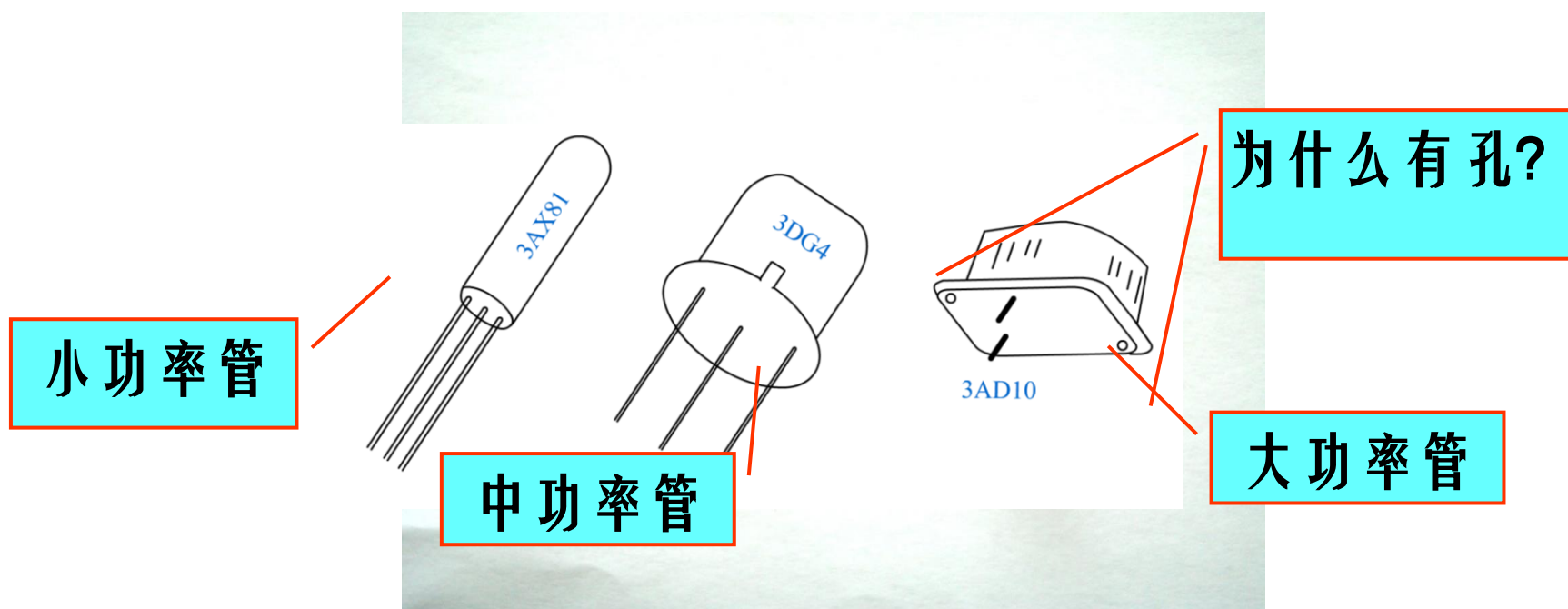
1. 结构与功能
2. 放大工作原理
3. Ebers-Moll 数学模型
4. 静态工作伏安特性曲线
5. 主要参数





一、晶体管的结构

■ 双极型晶体管(BJT): 又称半导体三极管、晶体三极管



X: 低频小功率管

G: 高频小功率管

D: 低频大功率管

A: 高频大功率管

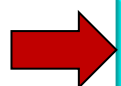
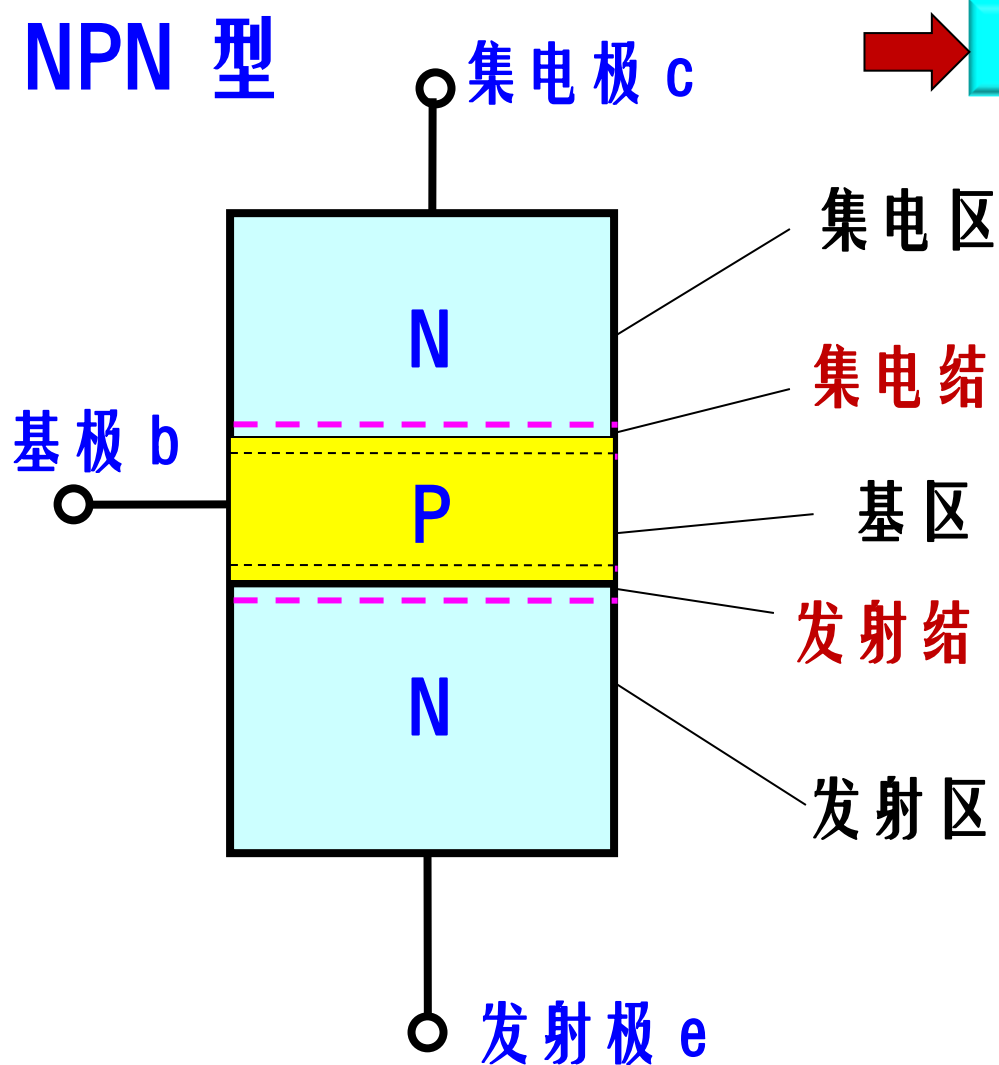
三极管有两种类型: NPN 型和 PNP 型。



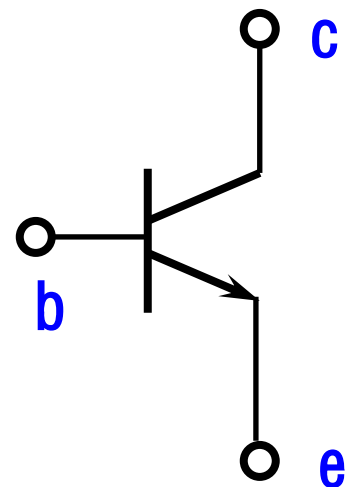
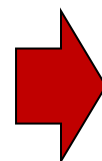


(1) 三极管结构

NPN 型



三个区、三个极、两个PN结。

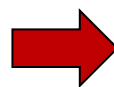
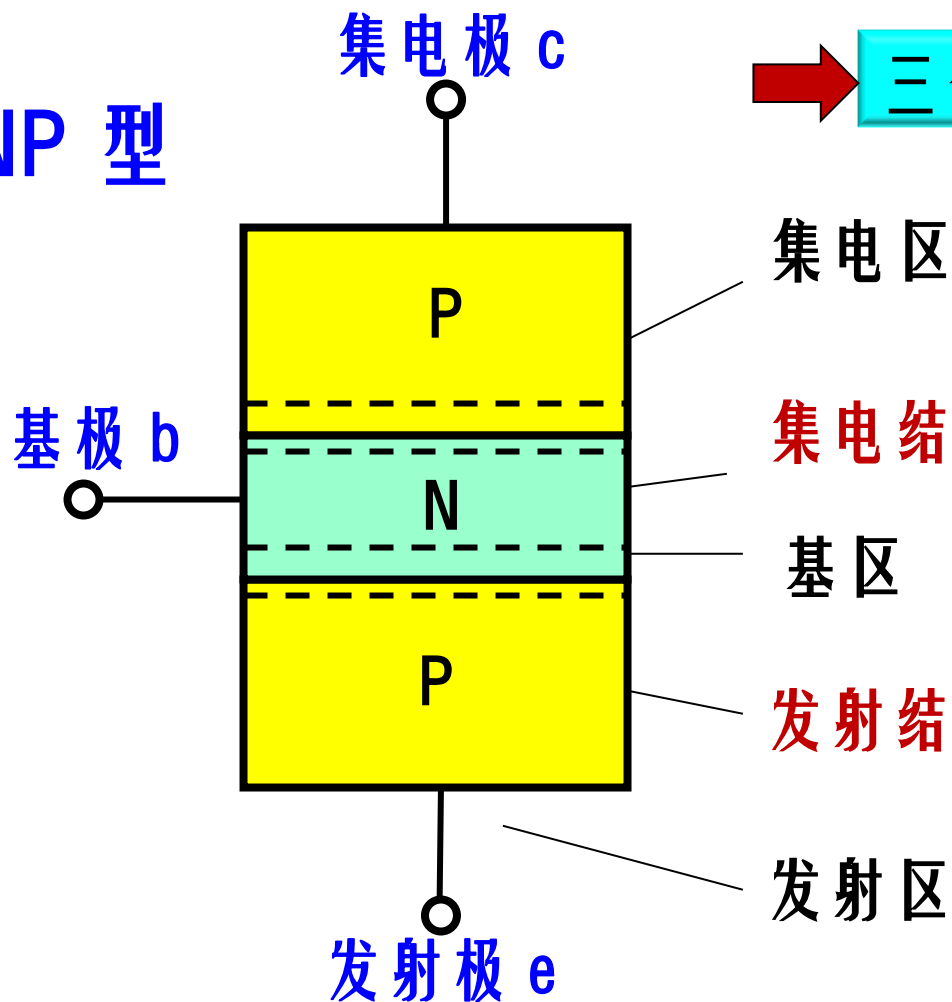


符号

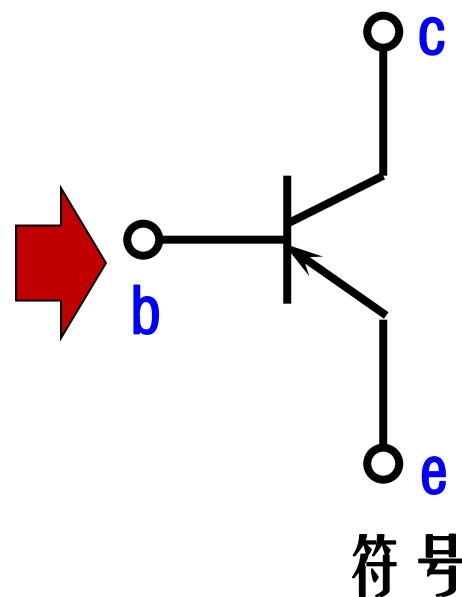


(2) 三极管结构

PNP 型



三个区、三个极、两个PN结。

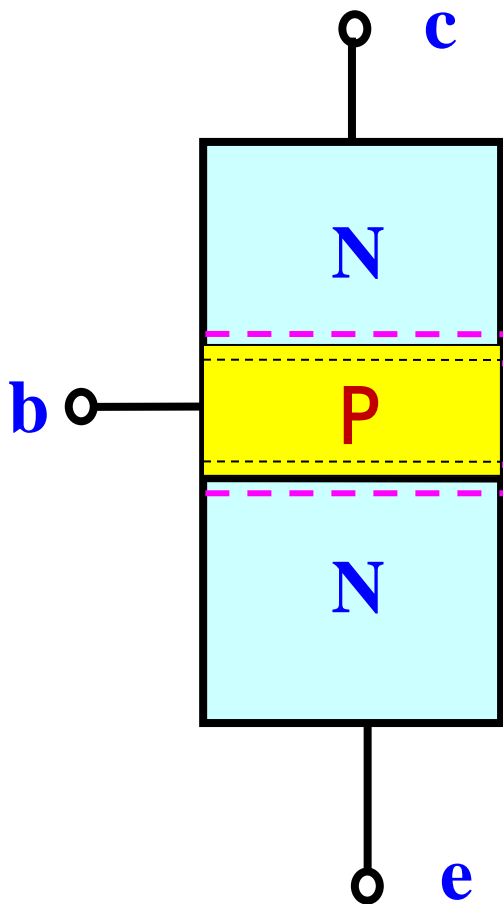


(b)PNP 型



二、晶体管的电流放大原理

■ 以 NPN 型三极管为例讨论

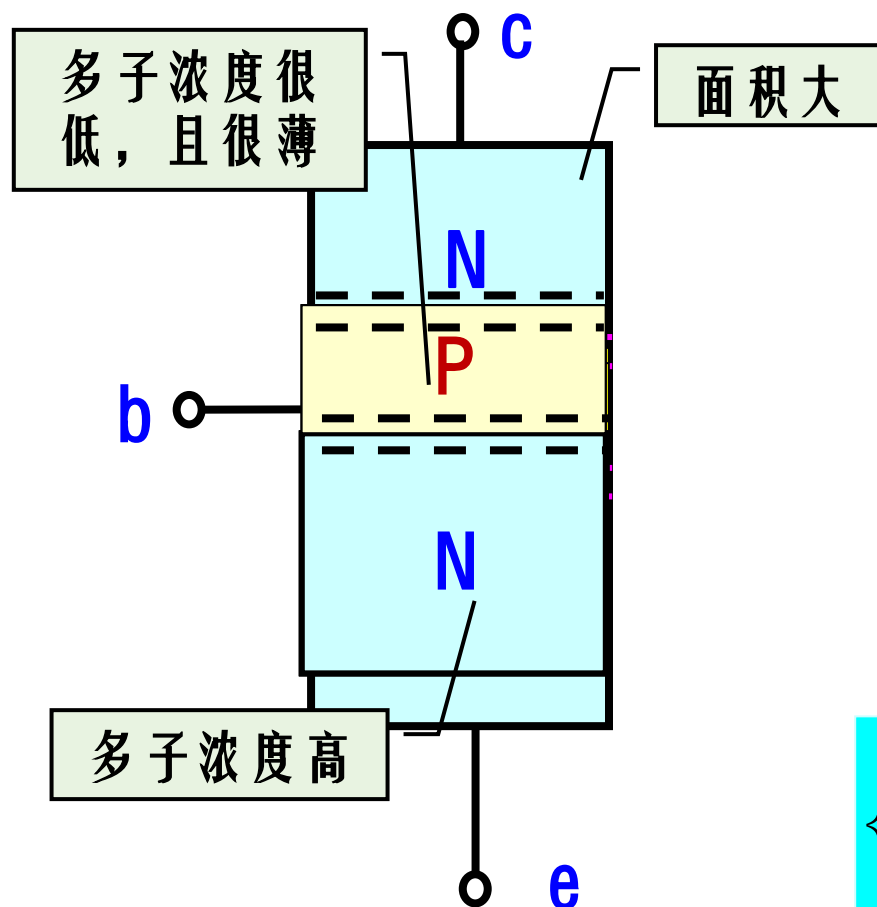


三极管若实现放大，必须从三极管内部结构和外部所加电源的极性来保证。





(1) 三极管放大条件



■ 内部结构：

1. 发射区 **高掺杂**。
2. 基区做得 **很薄**。几微米到几十微米，且 **掺杂较少**。
3. 集电结 **面积大**。

■ 外部条件：

$$\begin{cases} U_{BE} > U_{on} & \text{(发射结正偏)} \\ U_{CB} \geq 0 \Rightarrow U_{CE} \geq U_{BE} & \text{(集电结反偏)} \end{cases}$$



(2) 实验：三极管放大工作原理

1) 放大电路

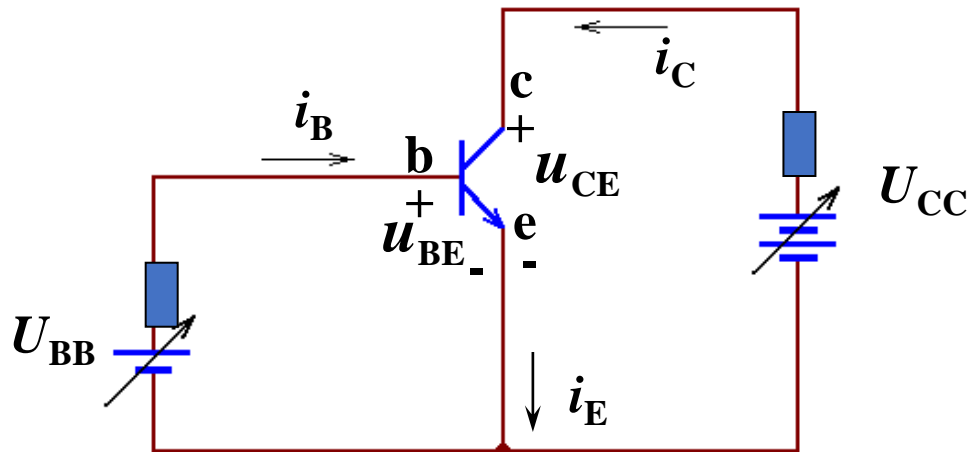


表1-1 电流单位：mA

i_B	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
i_C	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
i_E	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

放大约39

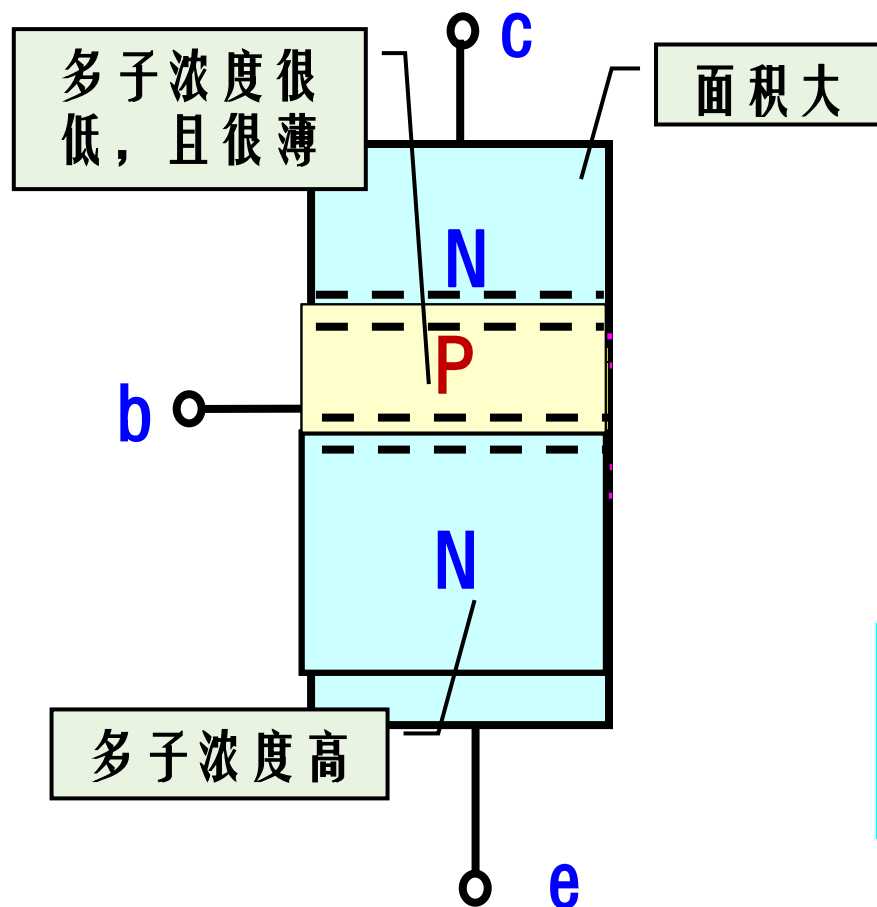
放大约40

结论： 基极 i_B 控制集电极电流 i_C 和发射极电流 i_E 的作用。





上节回顾：三极管结构

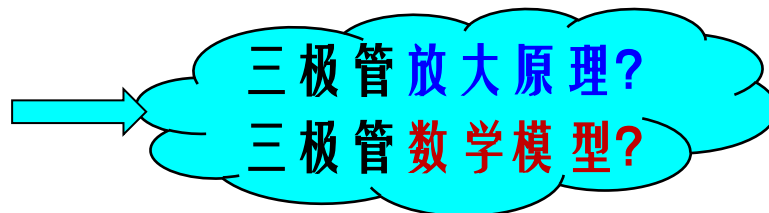


■ 内部结构：

1. 发射区 **高掺杂**。
2. 基区做得 **很薄**。几微米到几十微米，且 **掺杂较少**。
3. 集电结 **面积大**。

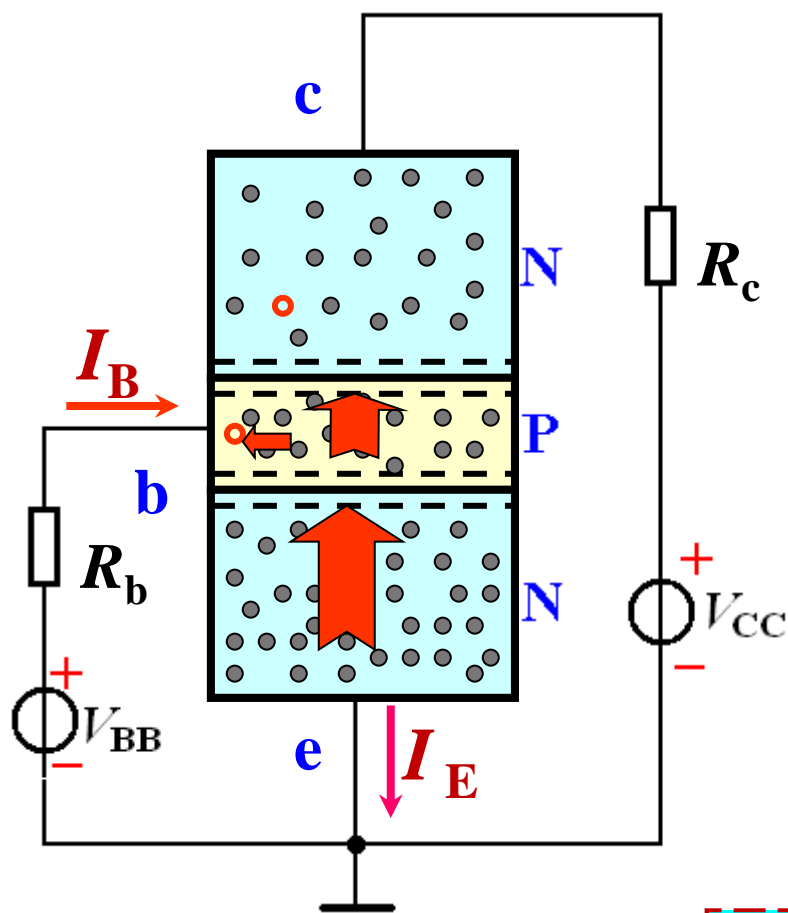
■ 外部条件：

$$\begin{cases} U_{BE} > U_{on} & \text{(发射结正偏)} \\ U_{CB} \geq 0 \Rightarrow U_{CE} \geq U_{BE} & \text{(集电结反偏)} \end{cases}$$





(3) 晶体管内部载流子的运动



1. 发射结加正向电压，扩散运动形成发射极电流

发射区的电子越过发射结扩散到基区，基区的空穴扩散到发射区——形成发射极电流 I_E (基区多数载流子数目较少，空穴电流可忽略)。

2. 扩散到基区的自由电子与空穴的复合运动形成基极电流

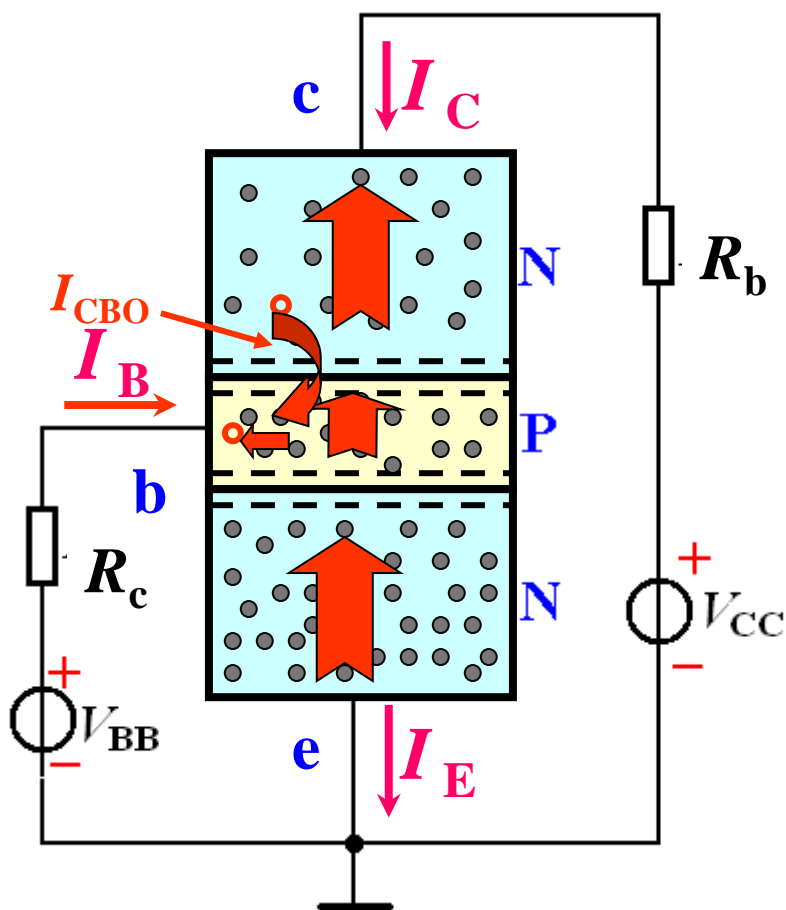
电子到达基区，少数与空穴复合形成基极电流 I_{bn} ，复合掉的空穴由 V_{BB} 补充。

➡ 多数电子在基区继续扩散，到达集电结的一侧。





(3) 晶体管内部载流子的运动



3. 集电结加反向电压，**漂移**运动形成集电极电流 I_c

集电结反偏，有利于收集基区扩散过来的电子而形成集电极电流 I_{cn} 。其能量来自外接电源 V_{cc} 。

4. 集电区和基区的少子在外电场的作用下将进行漂移运动而形成**反向饱和电流**，用 I_{CBO} 表示。





(3) 晶体管的电流分配关系

$$I_E \approx I_{En} = I_{Cn} + I_{Bn}$$

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

$$I_B \approx I_{Bn} - I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

- ◆ 扩散运动形成发射极电流 I_E
- ◆ 复合运动形成基极电流 I_B
- ◆ 漂移运动形成集电极电流 I_C

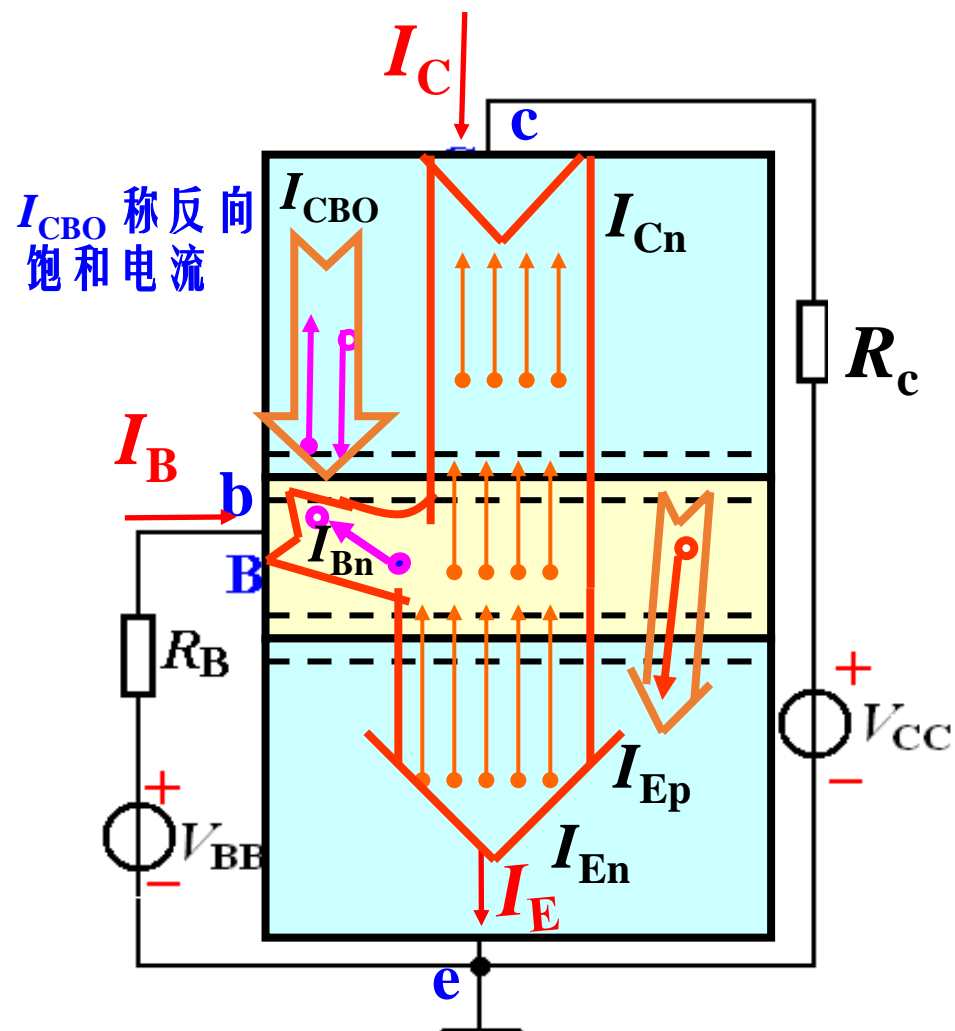


图 晶体管内部载流子的运动与外部电流





(3) 晶体管的共基电流放大系数

3、共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$

$$I_{Cn} = \bar{\alpha} I_E \rightarrow \text{表示发射区多子能够到达集电区的比例!}$$

$$I_{Bn} = (1 - \bar{\alpha}) I_E$$

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

$$I_B = I_{Bn} - I_{CBO} = (1 - \bar{\alpha}) I_E - I_{CBO}$$

消去 I_E

$$I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_B + \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} I_{CBO} + I_{CBO}$$

4、共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

令 $\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$

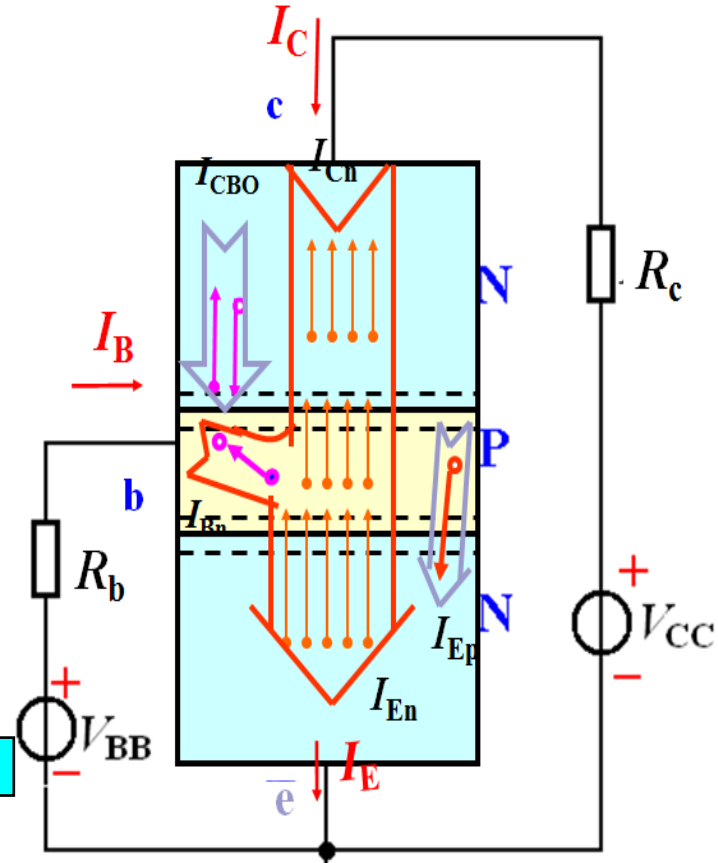
$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

穿透电流

I_{CBO} 、 I_{CEO} 很小，可忽略 \rightarrow

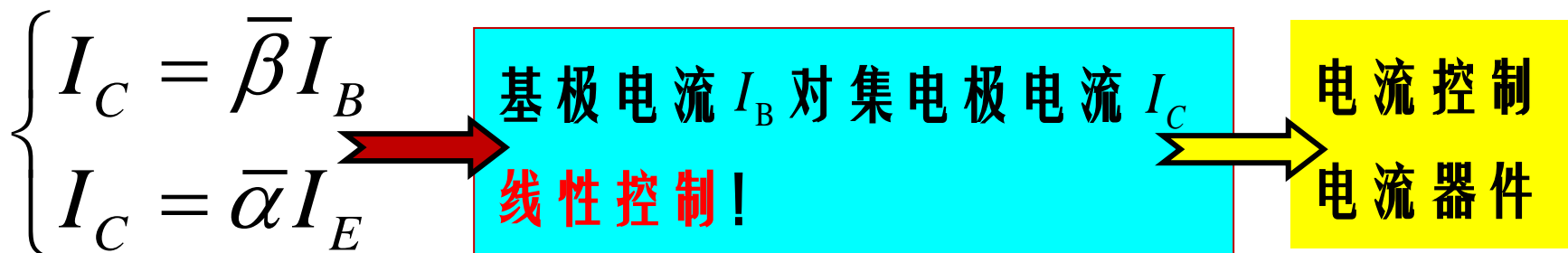
$$\begin{cases} I_C = \bar{\beta} I_B \\ I_C = \bar{\alpha} I_E \end{cases} \rightarrow \bar{\beta} : \text{分配给集电极的电流与分配基极电流之比!}$$

$$I_{Cn} = \bar{\beta} I_{Bn}$$





(4) 放大工作原理



- **放大原理**：实现小电流输入控制大电流输出；
- 换个角度看，利用发射极正偏电压亦可实现对集电极电流的控制，注意，此时是一种**非线性控制**，一般不予关注！
- 仅当晶体管处于**放大状态**时，上述关系式才成立！

➡ 一般偏置条件下，三极管的各种不同状态如何分析？

通用
模型？

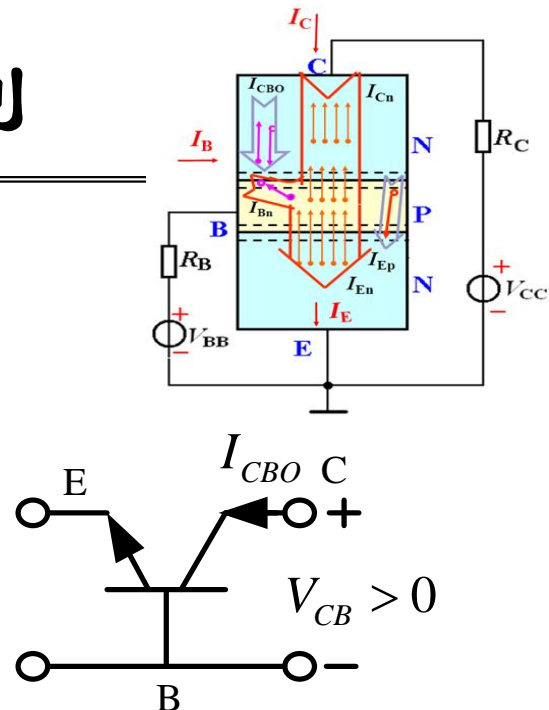




关注： I_{CBO} 和 I_{CEO} 的区别

■ I_{CBO} ：集电极-基极反向**开路**饱和电流

- 仅集电结反偏---少子漂移形成的很小电流；
- I_{CBO} 对温度较敏感，该值越小，说明晶体管的温度特性越好；



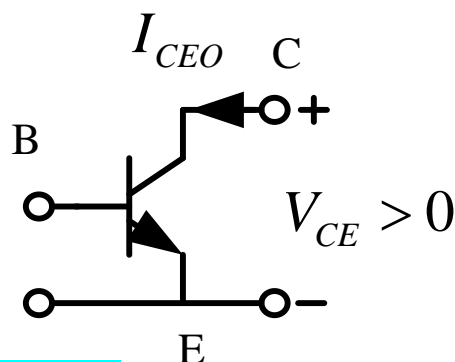
■ I_{CEO} ：集电极-发射极反向**开路**饱和电流--**穿透电流**

- 放大状态：集电结反偏+发射结正偏；
- 对应：少子漂移电流+多子扩散电流；

$$I_B = I_{Bn} - I_{CBO} = 0 \Rightarrow I_{Bn} = I_{CBO}$$

电流分配关系依然成立

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

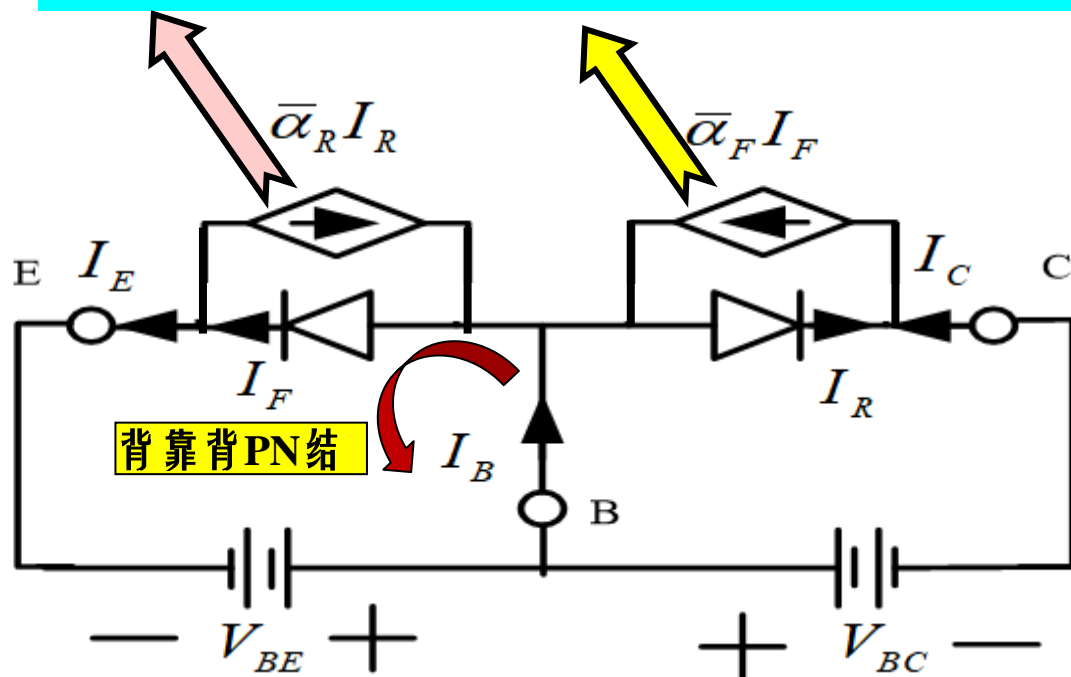




三. *Ebers-Moll* 数学模型

■ 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。

受控电流源：表达两者之间的相互影响！



Ebers-Moll 方程

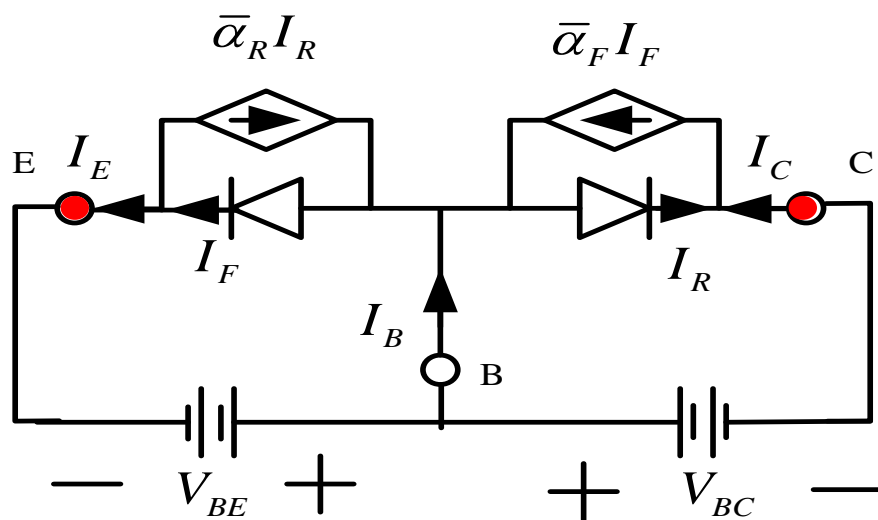
$$\begin{cases} I_E = f(V_{BE}, V_{BC}) \\ I_C = f(V_{BC}, V_{BE}) \end{cases}$$

→ 受控电流：反映了穿透基区的多子形成的电流！





(1) 数学模型



Ebers-Moll 方程：

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

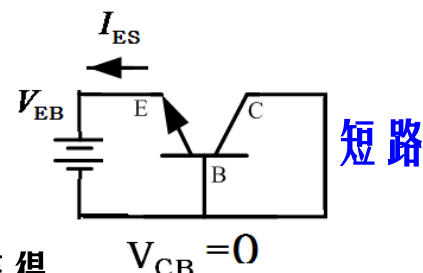
V_{BE} 和 V_{BC} 可正可负，描述所有工作状态！

二极管数学方程：

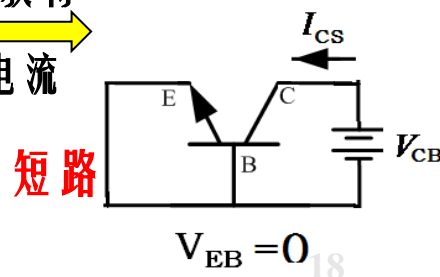
$$\begin{cases} I_F = I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) \\ I_R = I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \end{cases}$$

节点电流方程：

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



如何测试获得
反向饱和电流

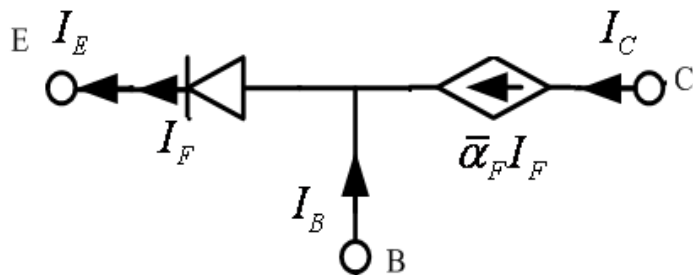




(2) 晶体管的工作状态

(1) 放大状态：发射结正向偏置，集电结反向偏置； $V_{BE} > 0, V_{BC} < 0$

- $I_R = -I_{CS} \approx 0$ ，忽略反向饱和电流；
- 发射结近似为正向偏置的PN结二极管，而集电极电流受发射极电流的线性控制；



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

➤ I_{CS} 与开路反向饱和电流 I_{CBO} 的关系？

$$\rightarrow I_C = I_{CS} + \bar{\alpha}_F I_F = I_{CS} + \bar{\alpha}_F (I_E - \bar{\alpha}_R I_{CS}) = \bar{\alpha}_F I_E + (1 - \bar{\alpha}_F \bar{\alpha}_R) I_{CS}$$

$$\rightarrow I_{CBO} = (1 - \bar{\alpha}_F \bar{\alpha}_R) I_{CS} \quad 19$$





(2) 晶体管的工作状态

(2) 饱和状态：发射结正向偏置，集电结正向偏置； $V_{BE} > 0, V_{BC} > 0$

➤ 该方程无法进行线性简化，仍为非线性方程，近似为：

$$\rightarrow \begin{cases} I_E = I_{ES} e^{V_{BE}/V_T} - \bar{\alpha}_R I_{CS} e^{V_{BC}/V_T} \\ I_C = -I_{CS} e^{V_{BC}/V_T} + \bar{\alpha}_F I_{ES} e^{V_{BE}/V_T} \end{cases} \rightarrow \text{指数式上升!}$$

(3) 截止状态：发射结反向偏置，集电结反向偏置；

$$V_{BE} < 0, V_{BC} < 0 \Rightarrow I_{CS}, I_{ES} \approx 0$$

➤ 截止状态的晶体管，发射极和集电极相当于开路；

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

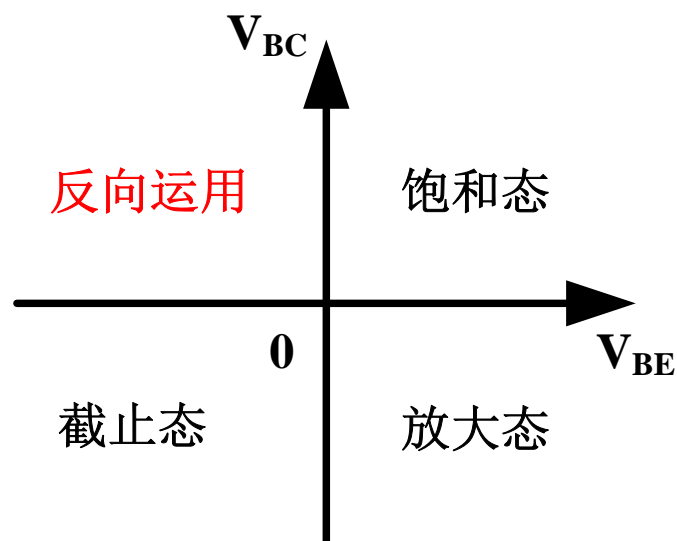




(2) 晶体管的工作状态

(4) 反向运用状态: 发射结反偏, 集电结正偏; $V_{BE} < 0, V_{BC} > 0$

➤ 反向运用状态 **禁用**, 因为发射极与集电极并不对称, 不能互换, 且发射结承受功率较小, 反向运用很容易损坏管子;



- ✓ 主要工作方式: 线性放大工作状态, 线性放大交流小信号;
- ✓ 饱和态和截止态更多应用于非线性及数字电路中;





(3) 三极管工作模式的判别

■ 三种工作状态判别：放大、截止、饱和

➤ 截止时， $V_{BE} < 0$ ， $I_B \approx 0$ ，容易判别。

➤ 饱和的主要特点： $\beta I_B \neq I_C$ ，一般 $\beta I_B > I_C$ 。

■ 实际计算：

- (1) 先假定工作在放大区，求静态工作 Q 点的参量；
- (2) 若得出矛盾，则表示工作在饱和区，再用饱和压降估算工作点；
- (3) 若不矛盾，则工作在线性放大区；





举例

■ 例 : 已知: $\beta = 100$, 线性区 $V_{BE} = 0.7V$, 饱和时

$V_{BE} = 0.7V$ $V_{CE} = 0.3V$ 。 求: 静态工作点 I_{BQ} I_{CQ}

解: 先假定三极管工作于线性区。

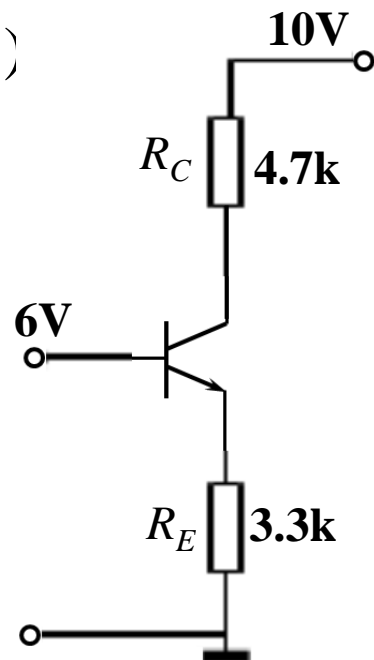
$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{6 - 0.7}{3.3} = 1.6(mA) \quad V_C = 10 - 4.7 \times 1.6 = 2.48(V)$$

而 $V_B = 6(V)$ 得到矛盾, 应工作于饱和区。

$$I_{EQ} = \frac{6 - 0.7}{3.3} = 1.6(mA), \text{ 不变。}$$

$$V_C = V_E + V_{CE} = 5.3 + 0.3 = 5.6(V)$$

$$I_{CQ} = \frac{10 - 5.6}{4.7} = 0.94(mA) \quad I_{BQ} = I_{EQ} - I_{CQ} = 0.66(mA)$$





思考

■ 考虑 R_E 怎样变化, BJT 可以工作于放大状态?

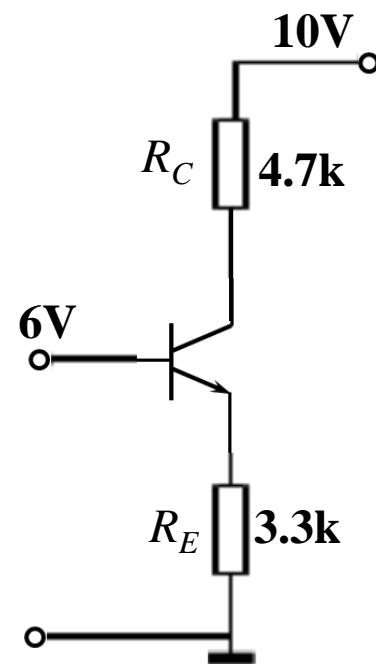
解: 应使集电结反偏, 即: $V_C > V_B = 6V$

$$\text{于是: } V_{C\min} = 6V \Rightarrow I_{C\max} = \frac{10-6}{4.7} = 0.85(mA)$$

$$\Rightarrow I_{E\max} \approx I_{C\max} = 0.85(mA)$$

$$\Rightarrow R_{E\min} = \frac{V_E}{I_{E\max}} = \frac{V_B - 0.7}{I_{E\max}} = 6.2k\Omega$$

要求 $R_E > R_{E\min} = 6.2k\Omega$, 以保证三极管处于放大状态

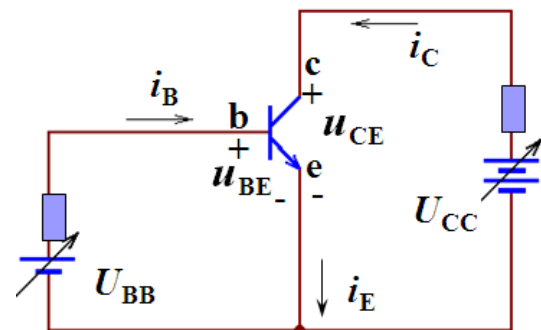




四. 三极管静态伏安特性曲线

■ **静态**：三极管只加直流，不加交流；

■ **伏安特性曲线**：



晶体管输入回路和输出回路 **极电压和电流** 的关系曲线；

■ **针对不同组态**：

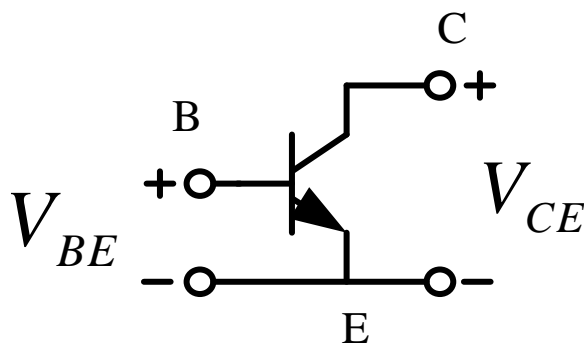
- 以晶体管任意一个电极作为公共端，即可形成一种输入、输出 **双端口电路** 网络形式，称之为组态；
- **定义电流方向** 为三极管线性放大状态时的电流方向；
- 以公共端为参考点，输入、输出端 **电压上正下负**；





(1) 晶体管三种组态

■ 共发组态:

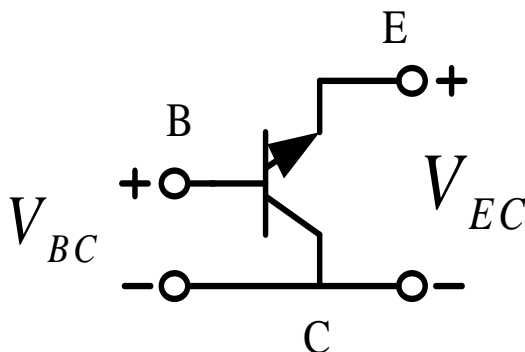


✓ 输入端口：基极与发射极构成

✓ 输出端口：集电极与发射极构成

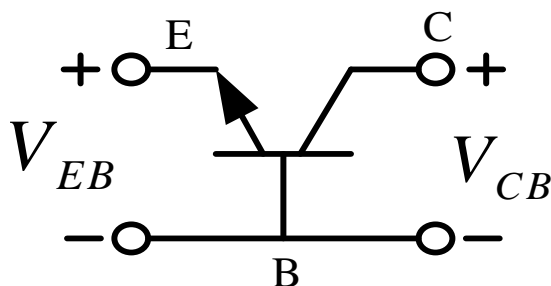
➡ $V_{BE} > 0, \quad V_{CE} > V_{BE}$

■ 共集组态



➡ $V_{BC} < 0, \quad V_{EC} < V_{BC}$

■ 共基组态



➡ $V_{EB} < 0, \quad V_{CB} > 0$



(2) 共发组态输入端伏安特性

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

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

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

$$\rightarrow V_{CE} = V_{BE} + V_{CB} \Rightarrow V_{BC} = V_{BE} - V_{CE}$$

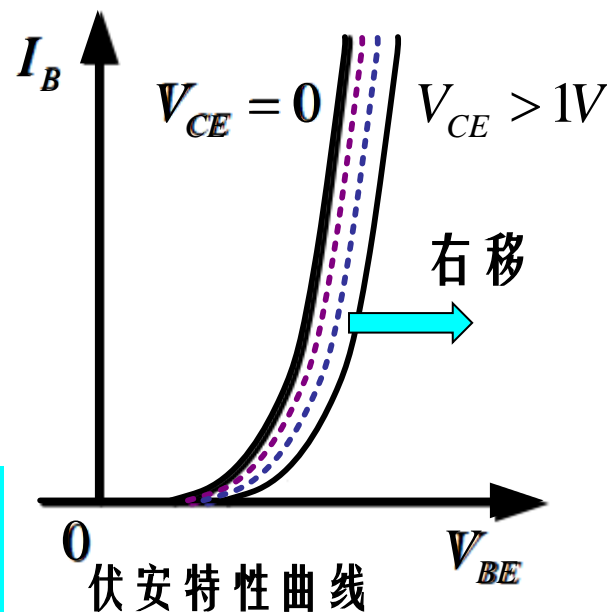
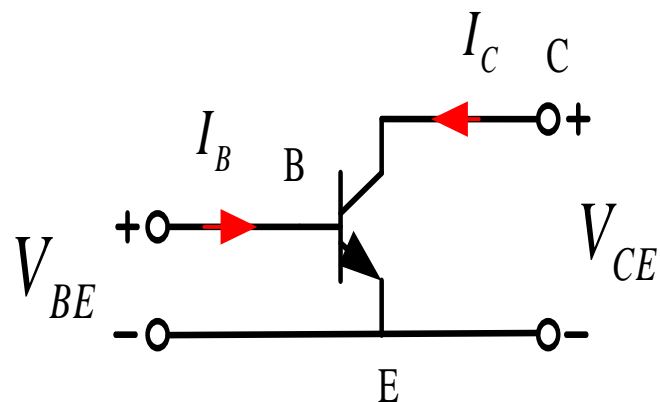
$$\rightarrow I_B = (1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS} \left(e^{(V_{BE} - V_{CE})/V_T} - 1 \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{若 } V_{CE} = 0 \\ \text{二极管并联} \end{array} \right\} I_B = [(1 - \bar{\alpha}_F) I_{ES} + (1 - \bar{\alpha}_R) I_{CS}] \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right)$$

$$\text{当 } V_{CE} > 1V \text{ 时: } e^{-V_{CE}/V_T} \approx 0$$

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

输出端口电压 V_{CE} 对
输入电流影响较小







(2) 共发组态输出端伏安特性

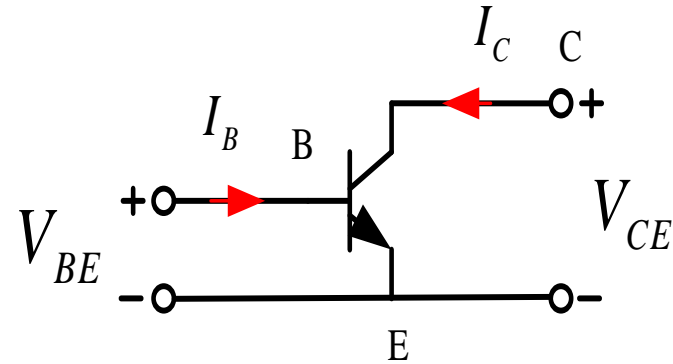
$$I_C = f(V_{BE}, V_{CE}) = f(I_B, V_{CE}) = f(V_{CE}) \Big|_{I_B=C}$$

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

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

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

$$\begin{aligned} (1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F) I_{CS} &= I_{CBO} \\ \frac{1}{1 - \bar{\alpha}_F} &= (1 + \bar{\beta}_F) \Rightarrow \bar{\beta}_F I_B - (1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO} (e^{(V_{BE} - V_{CE})/V_T} - 1) \end{aligned}$$





(2) 共发射极输出端伏安特性

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

1) 当 $I_B = 0$ $V_{BE} = 0$ $I_C = (1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO} \left(1 - e^{-V_{CE}/V_T} \right) = (1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO} = I_{CEO} \approx 0 \rightarrow$ 截止区
 $V_{CE} > 0$

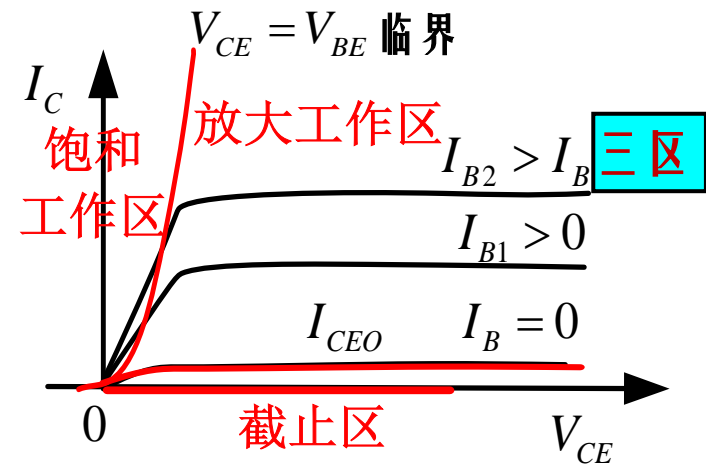
2) $V_{BE} > 0 \rightarrow I_C = \bar{\beta}_F I_B + (1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO} \left(1 - e^{-(V_{CE} - V_{BE})/V_T} \right) = \bar{\beta}_F I_B + (1 + \bar{\beta}_F) I_{CBO}$
 $I_B > 0$
 $V_{CE} > V_{BE}$ $V_{CE} - V_{BE} > 0 \rightarrow$ 线性放大区
 $= \bar{\beta}_F I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta}_F I_B$

3) $V_{BE} > 0$

$$V_{CE} < V_{BE} \quad V_{CE} - V_{BE} < 0$$

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

\rightarrow 饱和区



输出伏安特性曲线





(3) 共基组态输入伏安特性

Ebers – Moll方程:

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

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

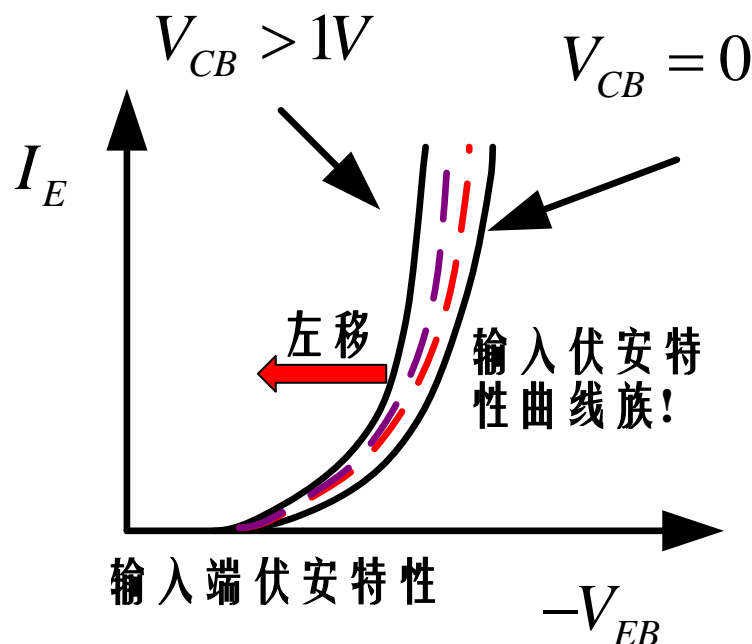
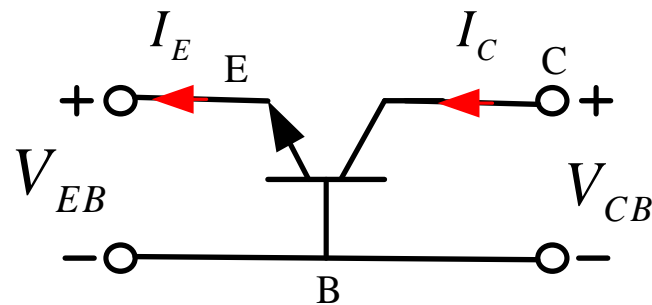
当 $V_{CB} = 0$ 时: $I_E = I_{ES} \left(e^{-V_{EB}/V_T} - 1 \right)$ 二极管
电流方程

当 $V_{CB} > 1V$ 时: $e^{-V_{CB}/V_T} \approx 0$

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

➤ 当 $V_{CB} > 1V$ 时, 近似重合为一条曲线;

➤ 输出端口电压 V_{CB} 对输入电流 I_E 影响较小

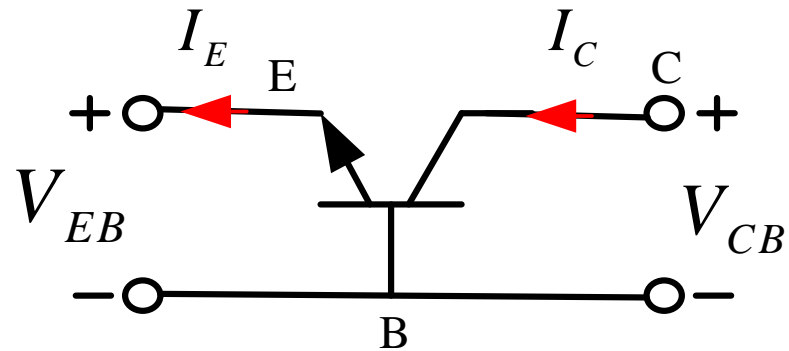




(3) 共基组态输出端伏安特性

建立 I_C 关于 I_E 的关系式:

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



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

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

$$\rightarrow I_C = \bar{\alpha}_F I_E - (1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F) I_{CS} \left(e^{-V_{CB}/V_T} - 1 \right)$$

输出伏安特性曲线

$$\rightarrow I_C = \bar{\alpha}_F I_E - I_{CBO} \left(e^{-V_{CB}/V_T} - 1 \right)$$





(3) 共基组态输出端伏安特性

■ 三种工作区的分割条件 $I_C = \bar{\alpha}_F I_E - I_{CBO} (e^{-V_{CB}/V_T} - 1)$

(1) 放大区: $\begin{cases} V_{CB} > 0 & e^{-V_{CB}/V_T} \approx 0 \\ I_E > 0 \end{cases}$

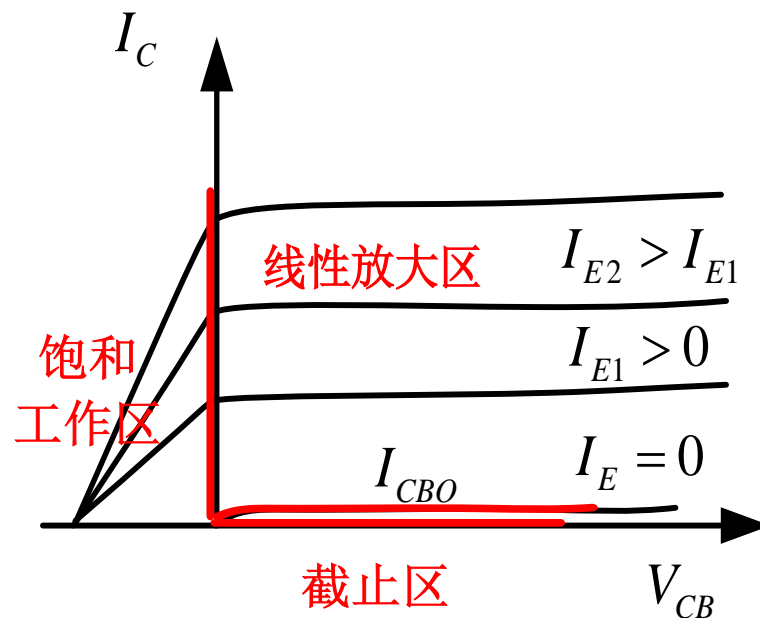
→ $I_C = \bar{\alpha}_F I_E + I_{CBO} \approx \bar{\alpha}_F I_E$ → 线性放大区

(2) 饱和区: $\begin{cases} V_{CB} < 0 & e^{-V_{CB}/V_T} > 0 \\ I_E > 0 \end{cases}$

→ $I_C = \bar{\alpha}_F I_E - I_{CBO} (e^{-V_{CB}/V_T} - 1)$ → 非线性饱和区

(3) 截止区: $\begin{cases} V_{EB} \geq 0 \text{ 时, } I_E = 0 \\ V_{CB} > 0 \longrightarrow e^{-V_{CB}/V_T} \approx 0 \end{cases}$

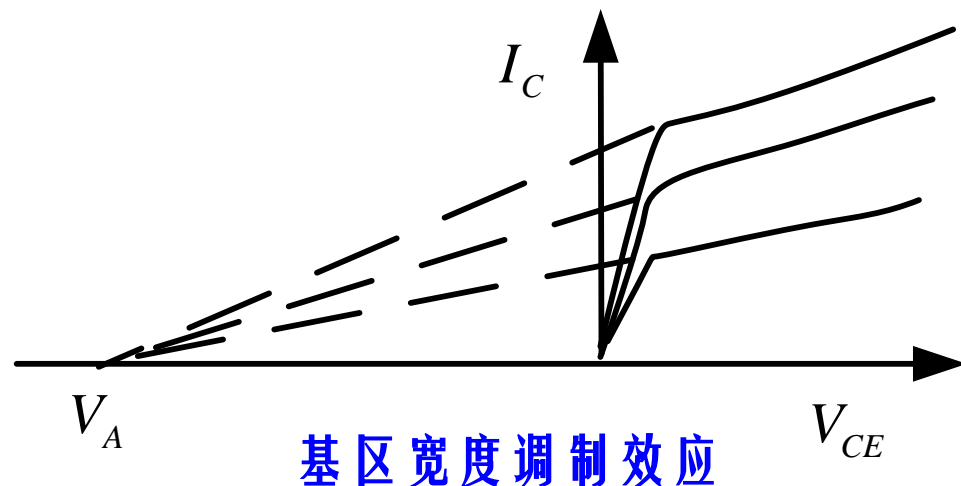
→ $I_C = I_{CBO} \approx 0$ → 截止区





(3) 厄利效应

■ 实际上， V_{CE} 增大将导致集电结空间电荷区的宽度增大，从而减小了基区宽度，致使通过基区的扩散电流增大，即集电极电流 I_C 随着 V_{CE} 增大而增加，



■ 厄利（Early）电压 V_A

➤ 斜线反向延长到零电流时，交于负电压轴上一点 V_A ，该点电压称为厄利电压， V_A 典型值在 50~300V





五. 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

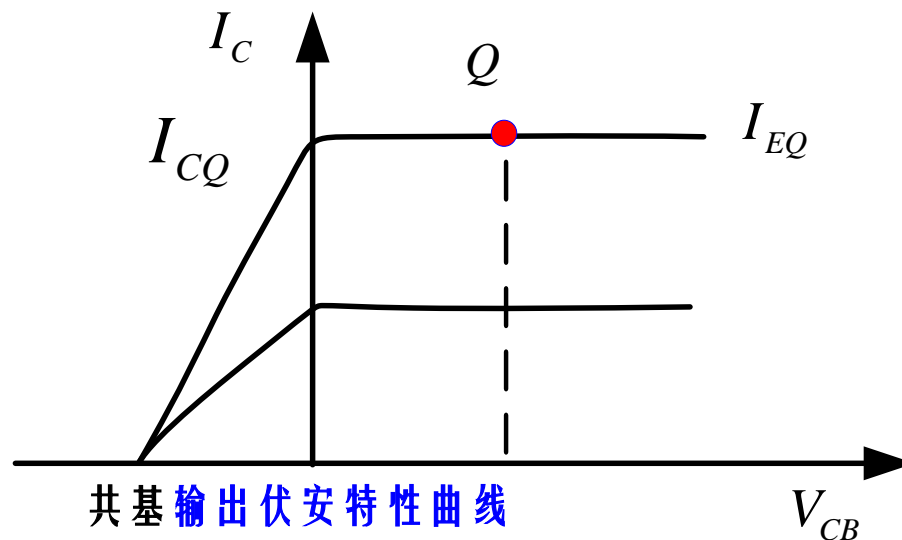




(1) 直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ $\bar{\beta}$

■ 共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$

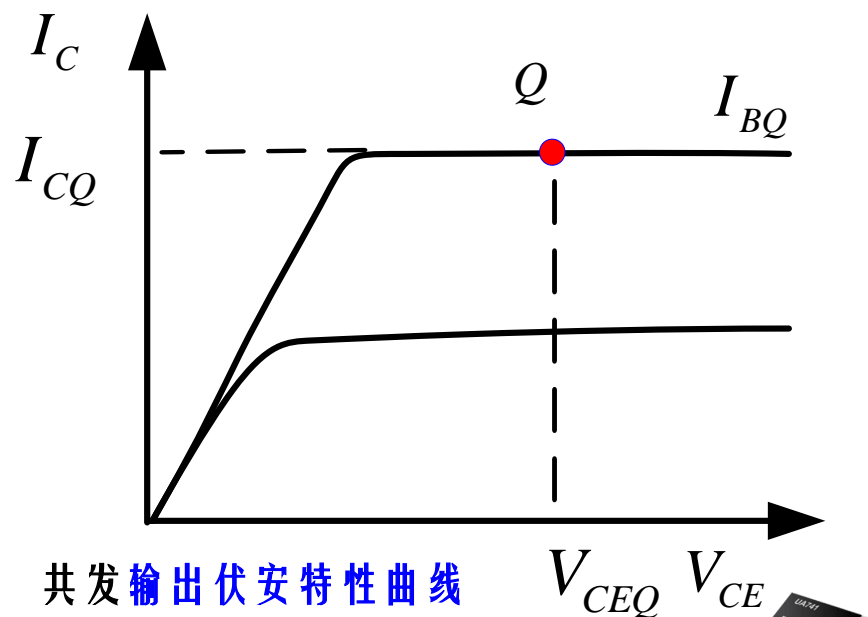
$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CQ}}{I_{EQ}}, 0.9 < \bar{\alpha} < 1$$



■ 共发直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}}$$

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}, \bar{\beta} \gg 1$$

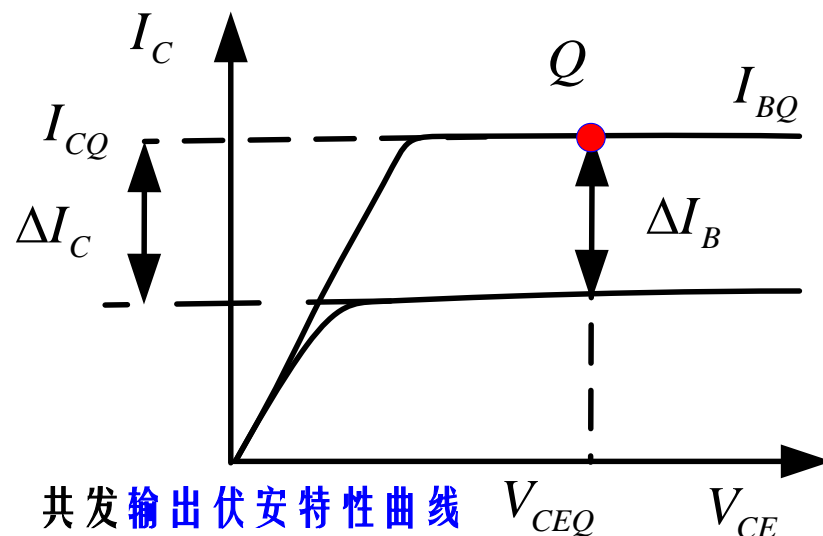




(1) 交流电流放大系数

■ 共发交流电流放大系数 β

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_Q = \frac{i_c}{i_b}$$

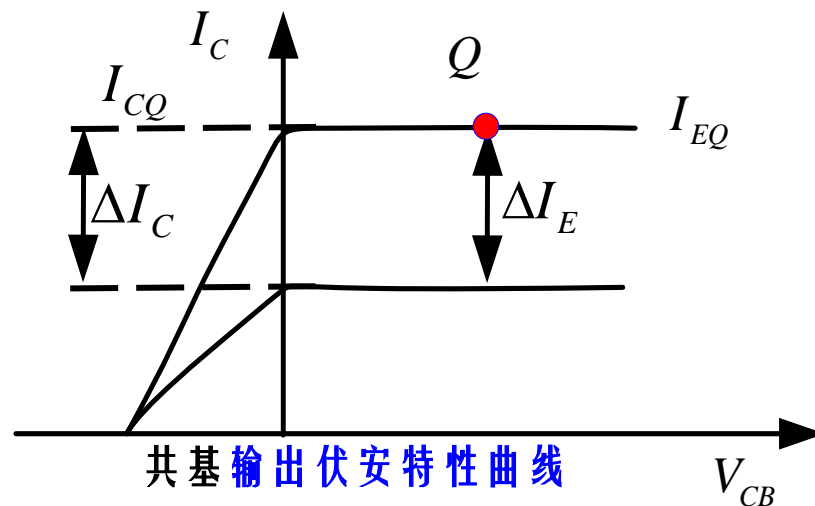


■ 共基交流电流放大系数 α

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \Big|_Q = \frac{i_c}{i_e}, 0.9 < \alpha < 1$$

➤ 交流状态下，两者仍满足关系

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \beta \gg 1$$

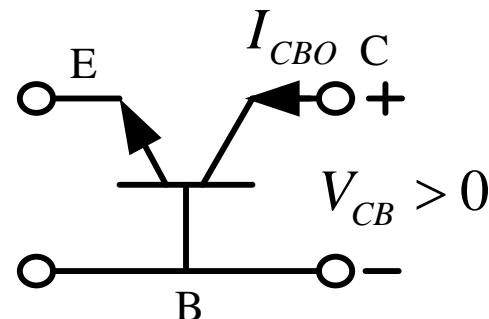




(2) 反向开路饱和电流

■ 集电极-基极反向开路饱和电流 I_{CBO}

- I_{CBO} 对温度较敏感，该值越小，说明晶体管的温度特性越好

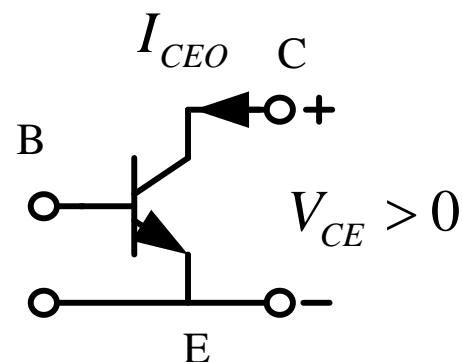


■ 集电极-发射极反向开路饱和电流 I_{CEO} ---- 穿透电流

- 此电流值越小，说明晶体管的性能越好

$$\begin{cases} I_C = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}} I_B + \frac{1}{1-\bar{\alpha}} I_{CBO} \\ I_B = 0 \end{cases}$$

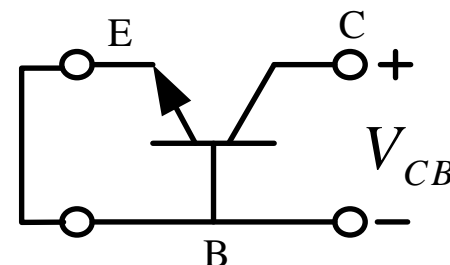
$$\Rightarrow I_C = I_{CEO} = \frac{1}{1-\bar{\alpha}} I_{CBO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} \Rightarrow I_{CEO} \gg I_{CBO}$$



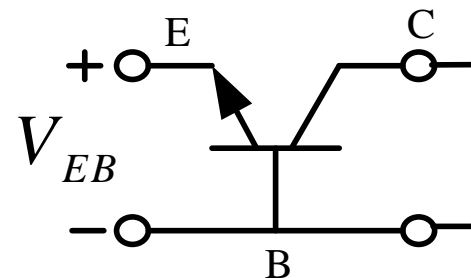


(2) 反向短路饱和电流

■ 集电极反向短路饱和电流 I_{CS}



■ 发射极反向短路饱和电流 I_{ES}



■ I_{CS} 与 I_{CBO} 的关系

$$V_{CB} > 1V, I_C = \bar{\alpha}_F I_E + (1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F) I_{CS}$$

$$\Rightarrow I_{CBO} = (1 - \bar{\alpha}_R \bar{\alpha}_F) I_{CS} \Rightarrow I_{CS} > I_{CBO}$$



(3) 极限参数

■ 晶体管能够正常使用时最大的电压，电流和功率值

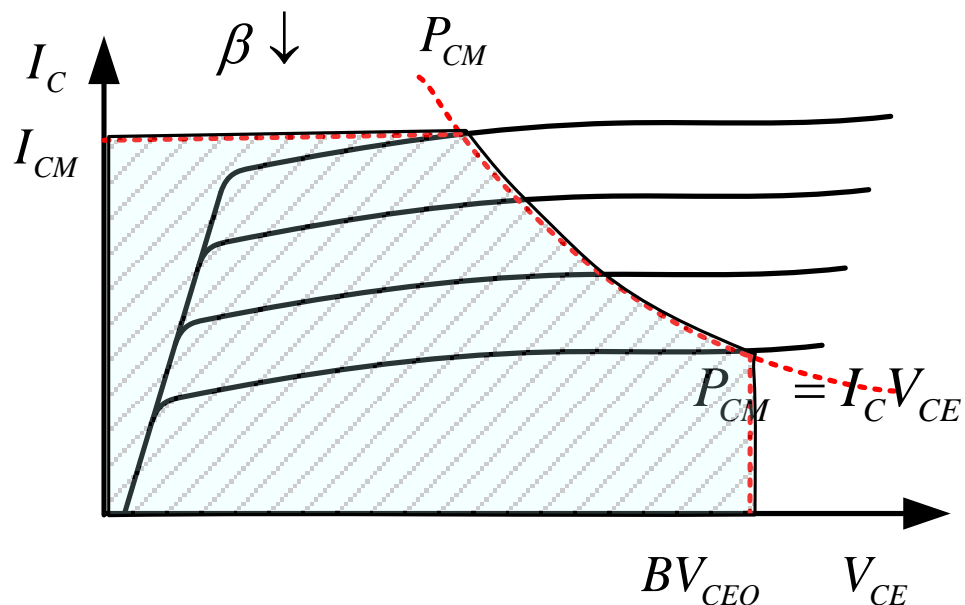
① 耗散功率 P_{CM} ：集电极最大允许耗散功率；

② 集电极最大允许电流 I_{CM}

③ PN结的最大反向击穿电压

➤ 当晶体管基极开路时；

集电极-发射极最大允许反向击穿电压，用 V_{CEO} 或 BV_{CEO} 表示；





(3) 极限参数

➤ 集电极-基极 反向击穿电压

- ✓ 该电压是指当晶体管发射极开路时，其集电极与基极之间的最大允许反向电压，用 V_{CBO} 或 BV_{CBO} 表示；

➤ 发射极-基极 反向击穿电压

- ✓ 该电压是指当晶体管的集电极开路时，其发射极与基极与之间的最大允许反向电压，用 V_{EBO} 或 BV_{EBO} 表示；





(4) 频率参数

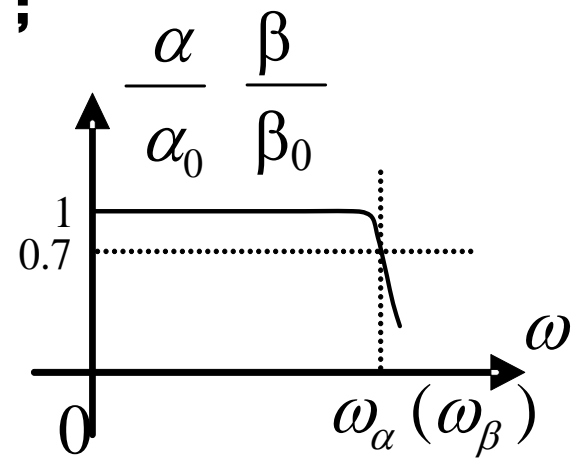
■ 频率特性： α 、 β 是**高频率** ω 的复函数， I_C 相对于 I_B 有相移。

$$\alpha(j\omega) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_\alpha}} \quad \beta(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + \frac{j\omega}{\omega_\beta}}$$

➤ α_0, β_0 ：低频时共基、共发电流放大倍数；

➤ $\omega_\alpha, \omega_\beta$ ：共基、共发截止频率；

$$|\alpha(j\omega_\alpha)| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{2}} \quad |\beta(j\omega_\beta)| = \frac{\beta_0}{\sqrt{2}}$$





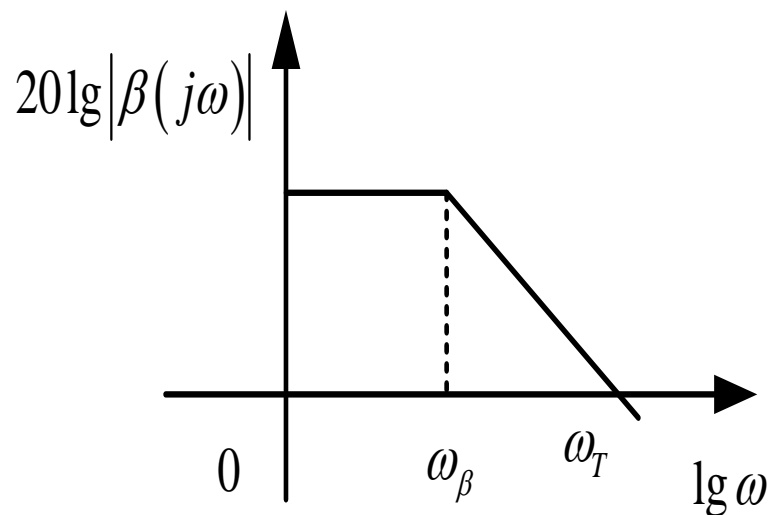
(4) 频率参数

■ 特征频率 ω_T : β 值降为1时晶体管的工作频率,

$$\begin{cases} |\beta(j\omega_T)| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_T}{\omega_\beta}\right)^2}} = 1 \\ \beta_0 \gg 1 \end{cases} \Rightarrow \omega_T \approx \beta_0 \omega_\beta$$

综合反映了管子的电流放大能力及频率带宽特性, 衡量管子品质的重要参数

- 通常 ω_T 大小, 分为低频管、中频管和高频管;
- 从波特图上看, 与横轴的交点频率即是特征频率 ω_T ;





(5) 结电容与体电阻

■ 结电容：扩散电容 C_e 和势垒电容 C_c

■ 基区体电阻 r_b

➤ 用于衡量基区宽度、掺杂浓度对基极交流电流的影响，记为 r_b ，一般在百欧量级；

■ 放大状态时的发射结电阻 r_e

➤ 发射结正偏时的交流阻抗，记为 r_e ，一般在百欧量级；

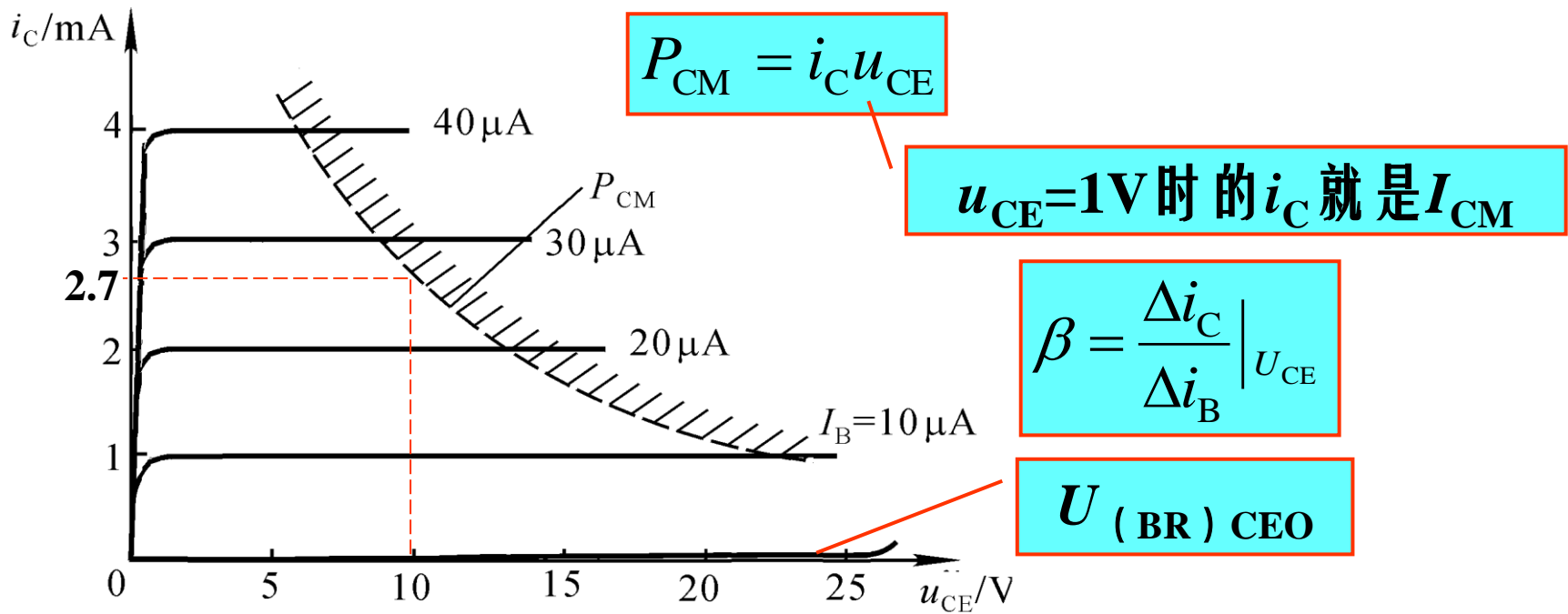
■ 放大状态时的集电结电阻 r_c

➤ 集电结反偏时的交流阻抗，记为 r_c ，一般在兆欧量级；





讨论



由图示特性求出 P_{CM} 、 I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 β 。

