

第1章 常用半导体器件

——王文俊

山西农业大学

七、晶体三极管的结构与工作原理

• 1、晶体三极管简介

晶体三极管，又称为晶体管、双极型晶体管（**BJT**）。



小功率管



中功率管

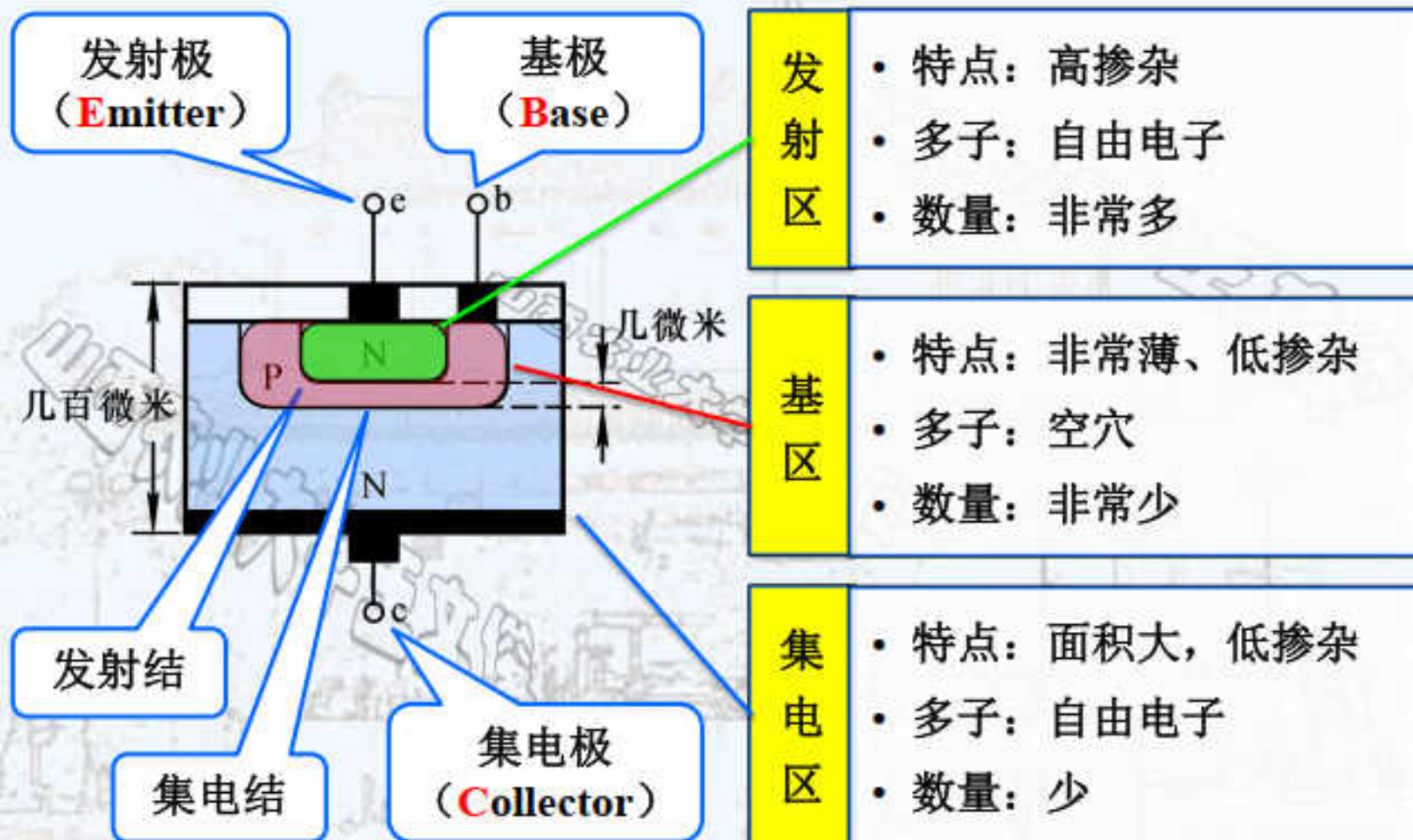


大功率管

由于有三个电极，所以称为晶体三极管。

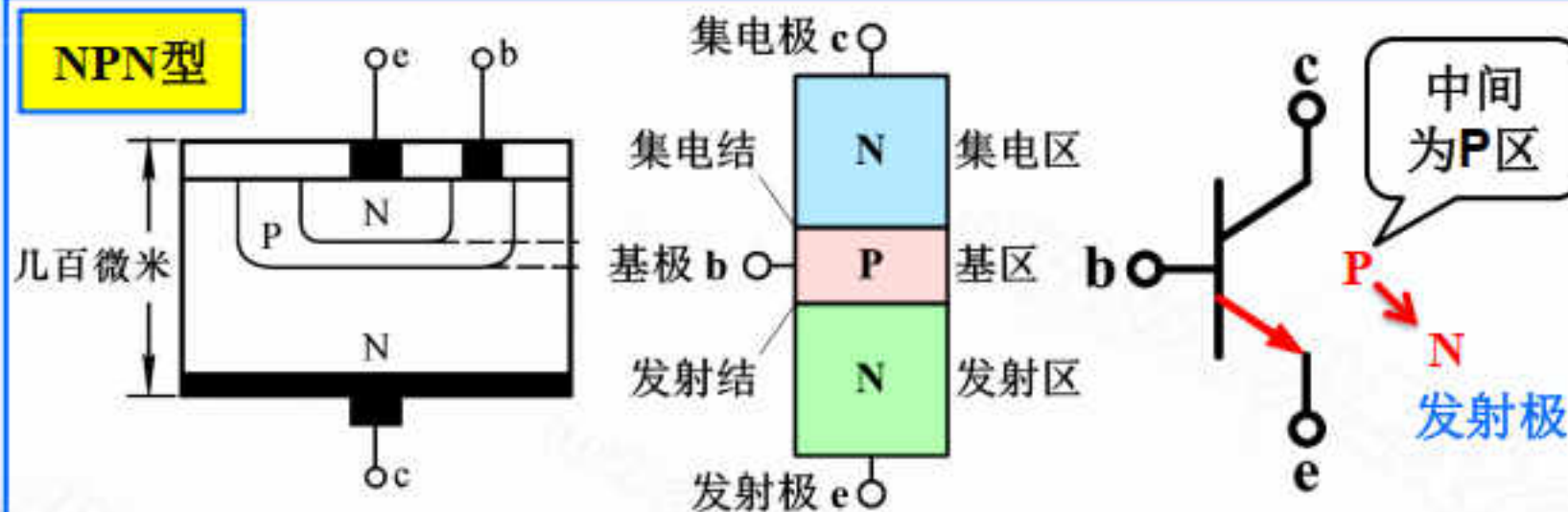
• 2、晶体管的结构

同一硅片上制造出三个掺杂区域，并形成两个PN结，就构成了晶体管。

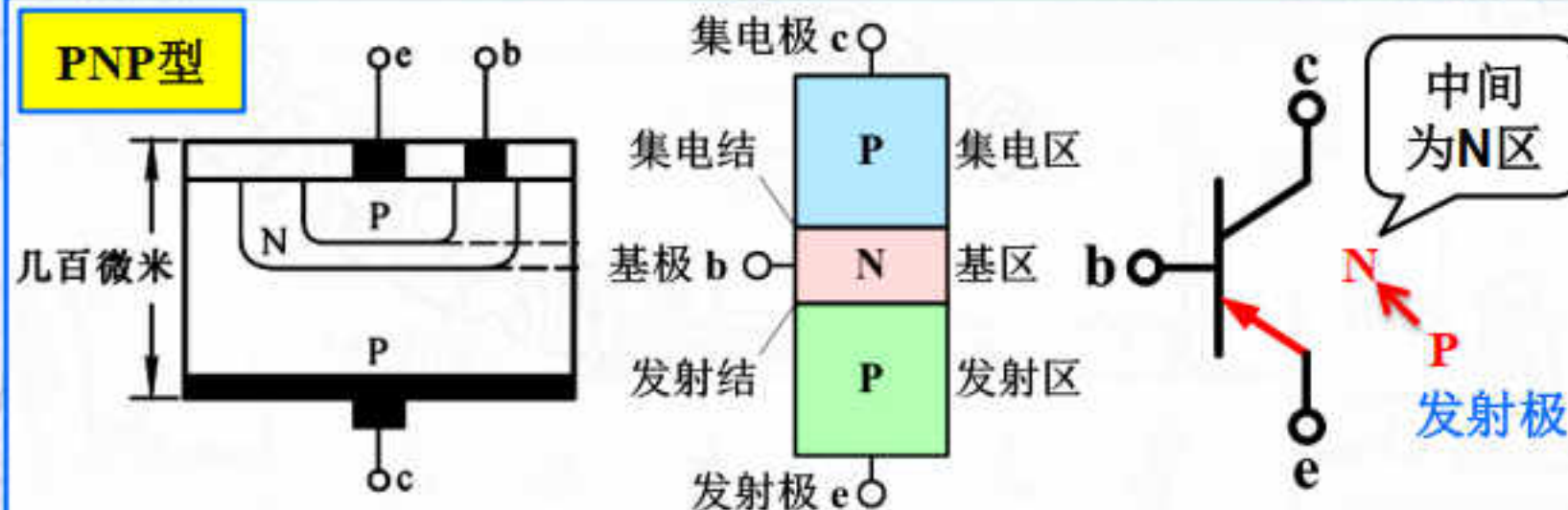


• 3、晶体管的两种类型

NPN型



PNP型



• 4、晶体管的电流放大作用

放大是对模拟信号最基本的处理。

传感器获得的电信号很微弱

- 只有经放大后才能做进一步处理；
- 只有经放大后才能具有足够大能量来驱动执行机构。



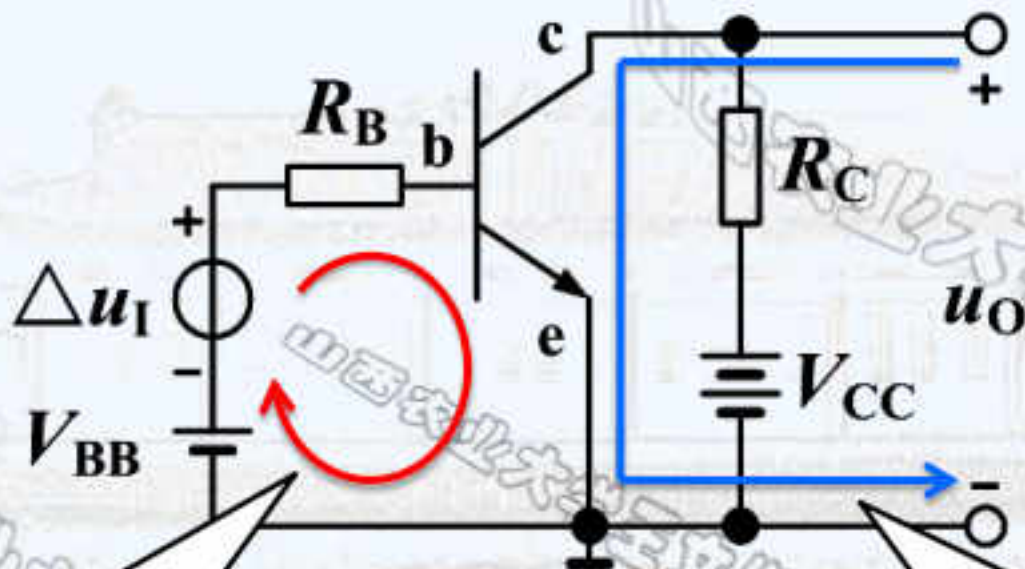
放大电路能够实现信号放大

- 晶体管是放大电路的核心元件。
- 晶体管能够控制能量的转换，将输入的任何微小变化不失真的放大输出。

山西农业大学

• 5、基本共射放大电路（NPN型）

晶体管最基本的放大电路为：共射放大电路。



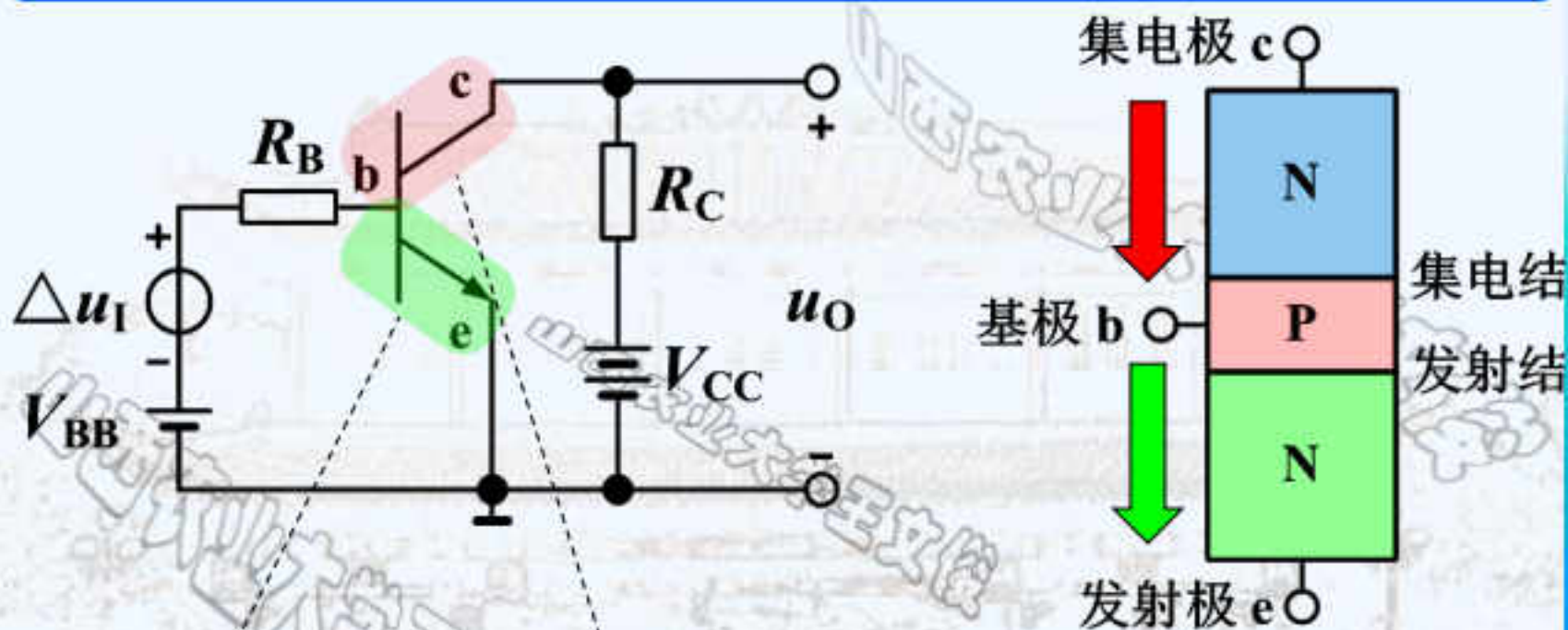
输入信号接入基极-发射极回路，称为输入回路。

输出信号在集电极-发射极回路，称为输出回路。

输入与输出共用发射极，称为共射放大电路。

• 6、晶体管工作在放大状态的条件（NPN型）

晶体管工作在放大状态的外部条件是：**发射结正偏且集电结反偏。**



发射结正偏

$$u_{BE} > U_{ON}$$

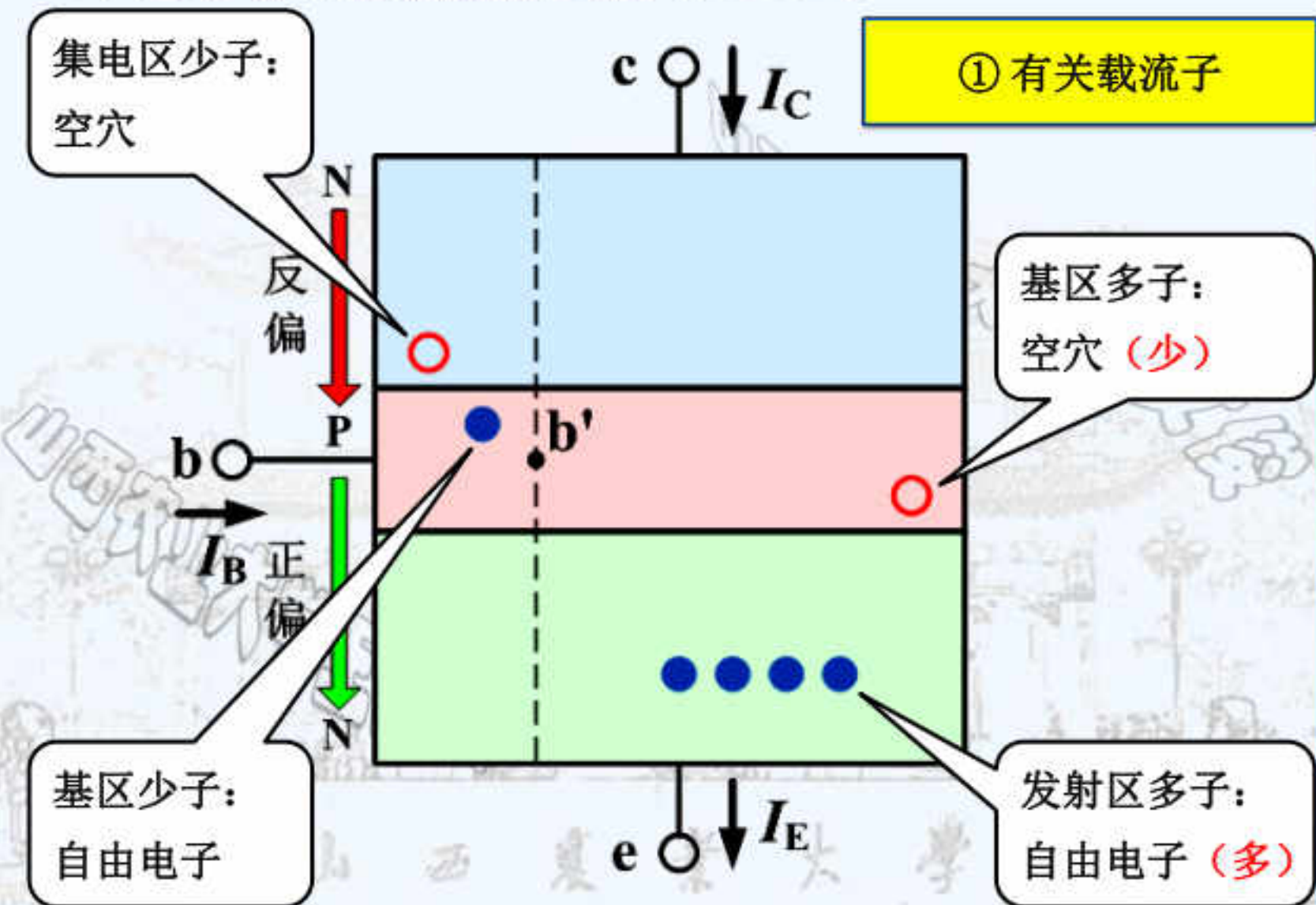
集电结反偏

$$u_{BC} \leq 0$$

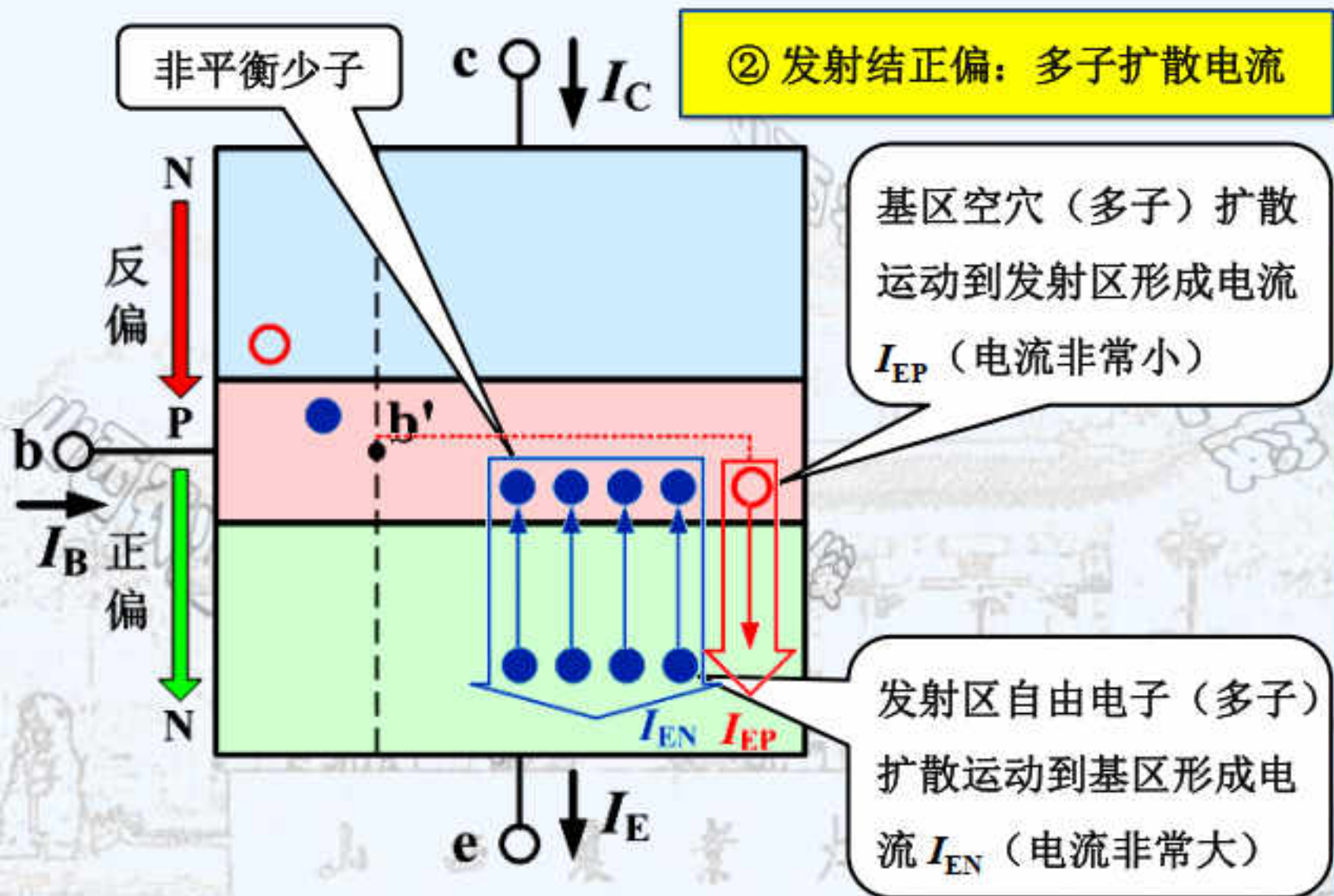
放大状态的条件

$$u_{BE} > U_{ON} \quad u_{CE} \geq u_{BE}$$

7、晶体管中的载流子运动 (NPN型)

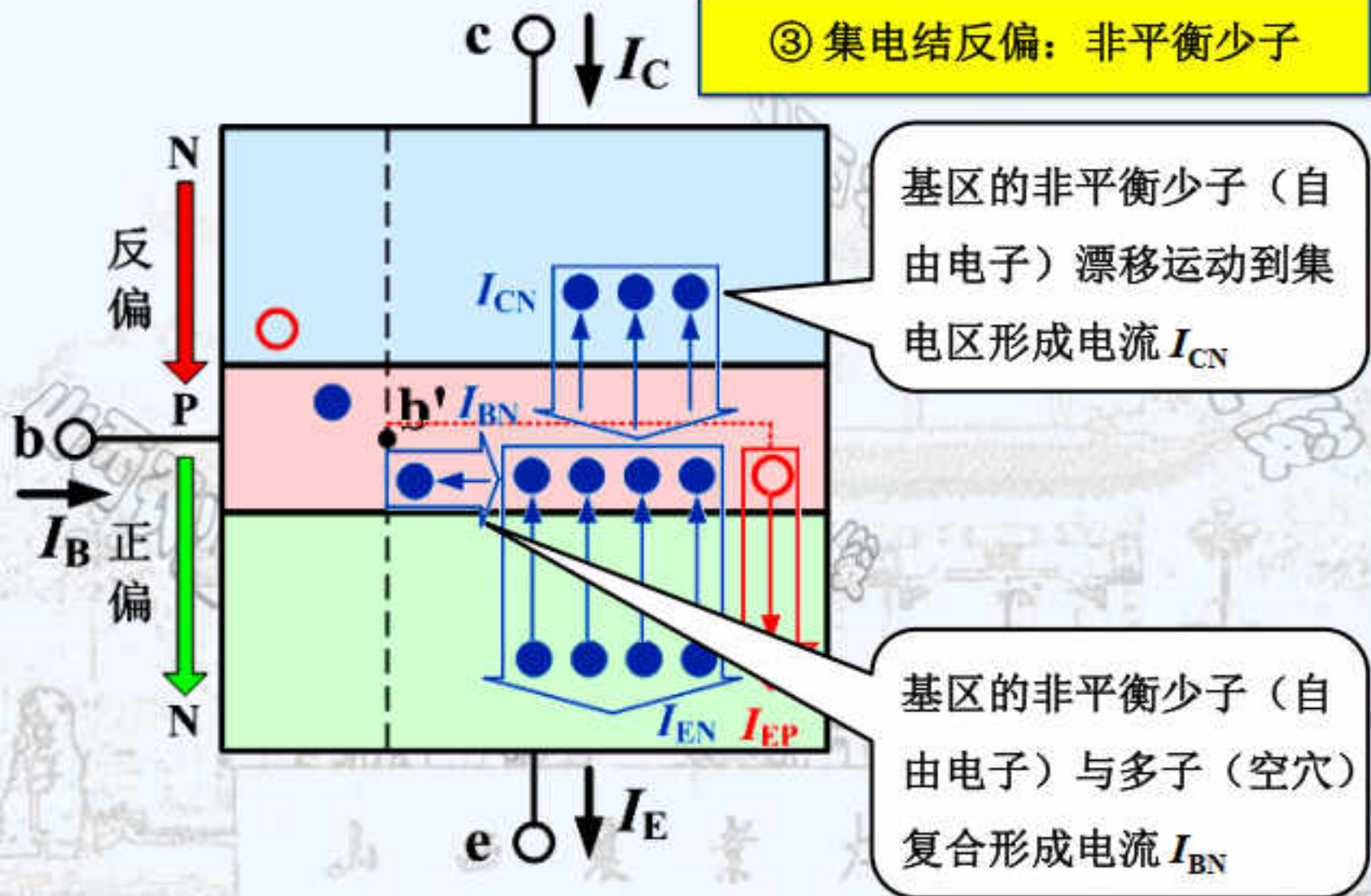


7、晶体管中的载流子运动（NPN型）



7、晶体管中的载流子运动（NPN型）

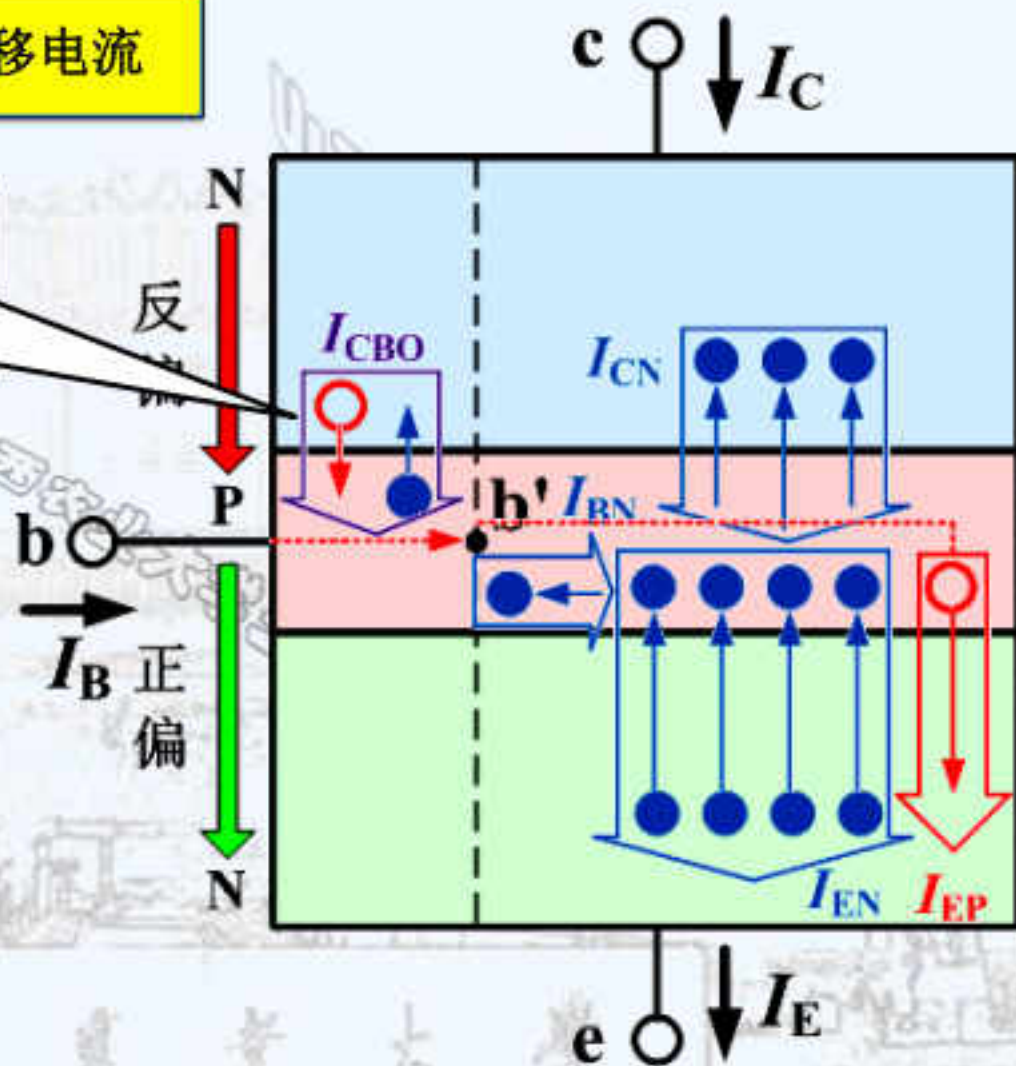
③ 集电结反偏：非平衡少子



7、晶体管中的载流子运动（NPN型）

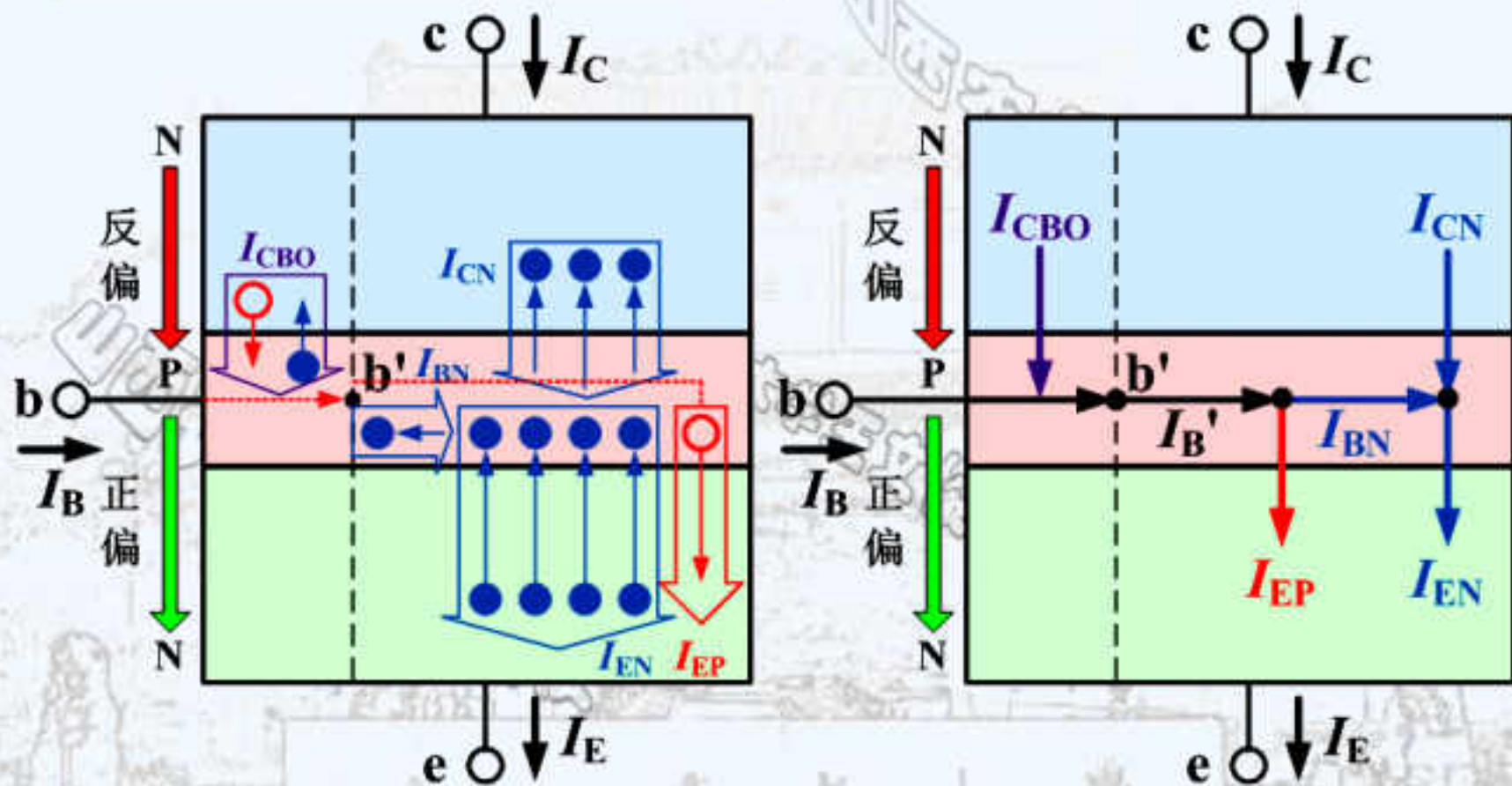
④ 集电结反偏：少子漂移电流

集电区与基区的
少子漂移电流 I_{CBO}

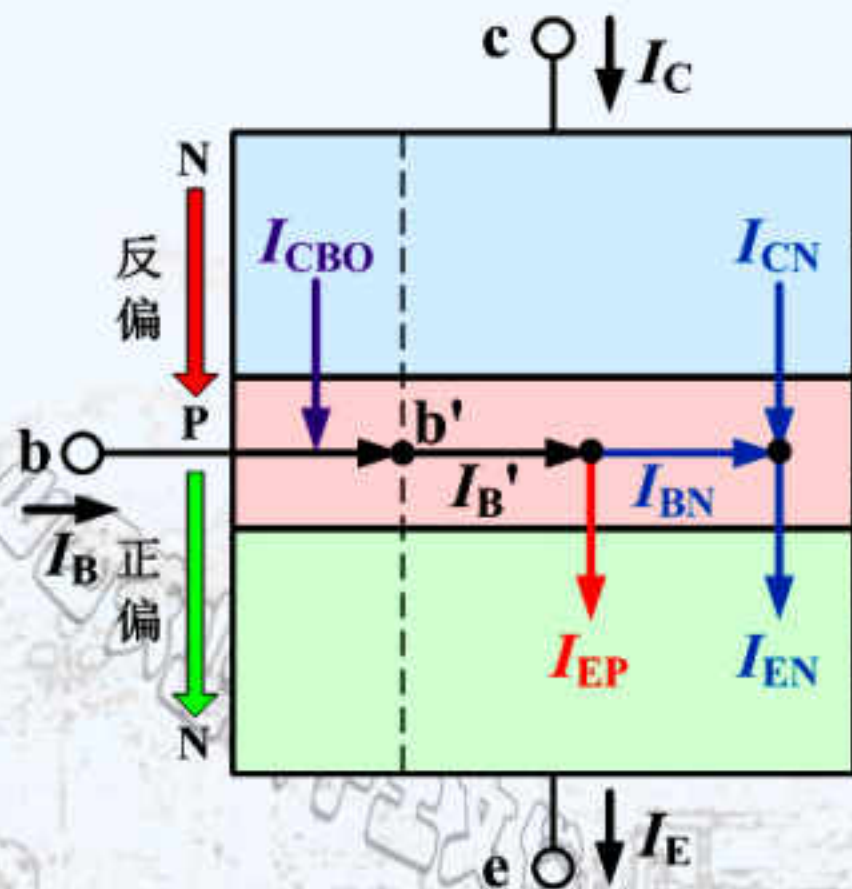


7、晶体管中的载流子运动（NPN型）

⑤ 载流子电流整理



8、晶体管电流分配的关系



集电极电流 I_C

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

基极电流 I_B

$$I_{BN} + I_{CN} = I_{EN}$$

$$I_B' = I_{BN} + I_{EP}$$

$$I_B = I_B' - I_{CBO}$$

发射极电流 I_E

$$I_E = I_{EP} + I_{EN}$$

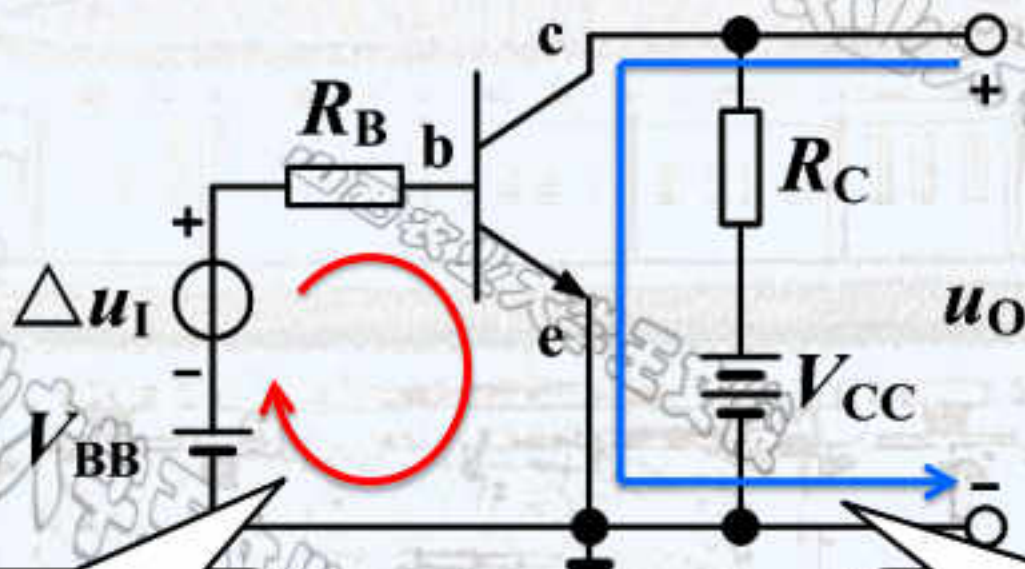
从外部看

$$I_E = I_B + I_C$$

八、共射放大电路的放大系数

• 1、基本共射放大电路（NPN型）

输入与输出共用发射极，称为共射放大电路。

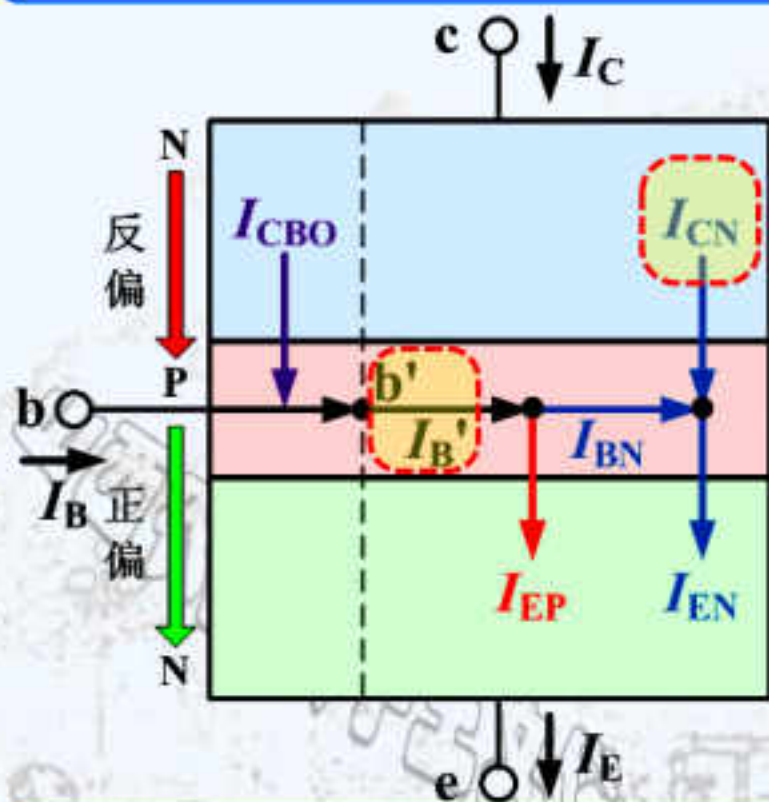


输入信号接入基极-发射极回路，称为输入回路。

输出信号在集电极-发射极回路，称为输出回路。

• 2、晶体管的共射直流放大系数

定义：电流 I_{CN} 与 I_B' 之比称为共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ 。



$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_B'}$$

多子电流在集电极和基极间的分配比例

因为： $I_{CN} = I_C - I_{CBO}$

$$I_B' = I_B + I_{CBO}$$

所以：
$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_B'} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

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

令 $I_B = 0$ ，电流 I_C 称为穿透电流 I_{CEO}

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

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

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

一般情况下:

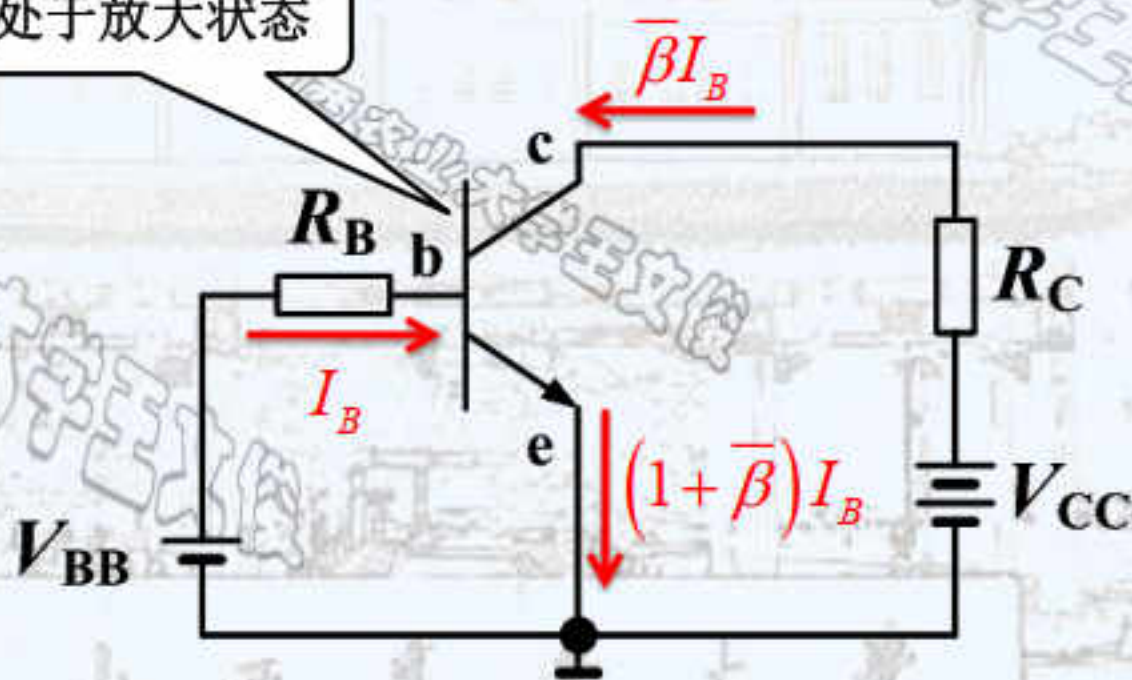
$$I_B \gg I_{CBO}, \bar{\beta} \gg 1$$



$$I_C \approx \bar{\beta} I_B$$

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

假设处于放大状态



• 3、晶体管的共射交流放大系数

定义：电流变化量 Δi_C 与 Δi_B 之比称为共射交流电流放大系数 β 。

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

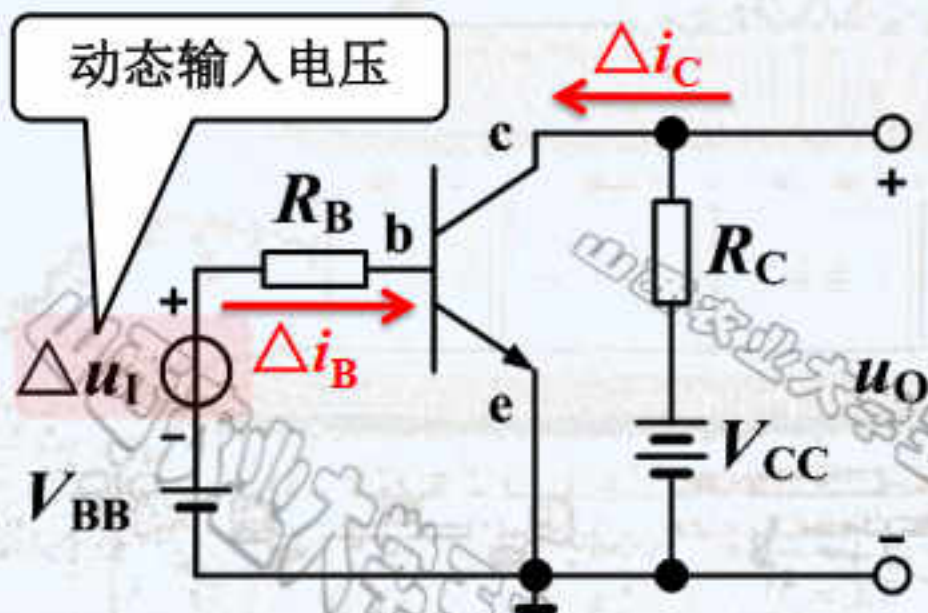
集电极和基极
电流变化量之比

直流： $I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$

当 $|\Delta i_B|$ 变化较小时，对上式

求导： $\Delta i_C = \bar{\beta} \Delta i_B$

因此： $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \bar{\beta}$



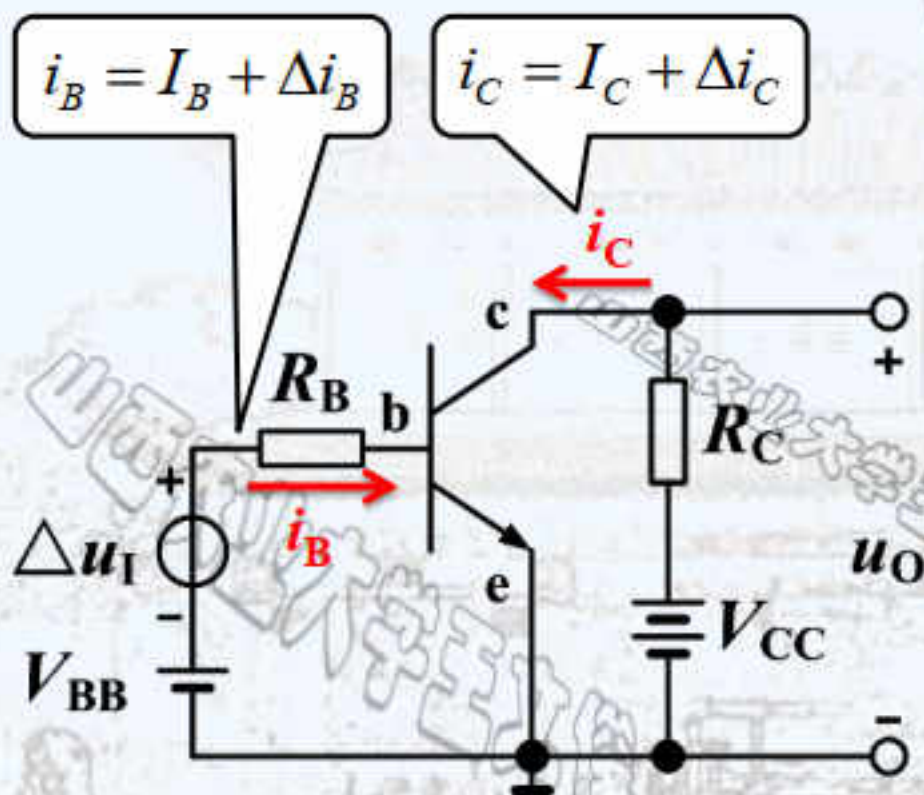
某直流量下的
直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

代替

该直流量基础上附加动态信号的
交流电流放大系数 β

• 4、共射放大电路中的总电流

晶体管中的总电流为直流电流与交流电流之和。



直流: $I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$

交流: $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$

总电流: $i_C = I_C + \Delta i_C$
 $= \bar{\beta} I_B + I_{CEO} + \beta \Delta i_B$

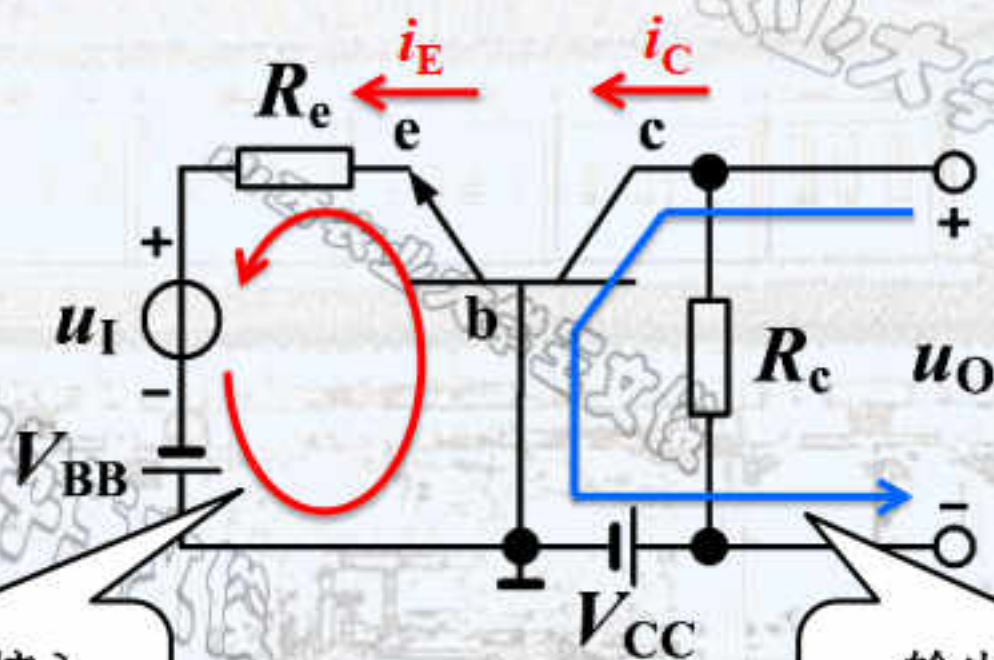
近似: $i_C \approx \bar{\beta} I_B + \beta \Delta i_B$
 $= \beta (I_B + \Delta i_B) = \beta i_B$

• 近似计算时, 不需要对 $\bar{\beta}$ 和 β 加以区分, 统一写为 $i_C \approx \beta i_B$ 。

九、共基放大电路的放大系数

• 1、基本共基放大电路（NPN型）

输入与输出共用基极，称为共基放大电路。

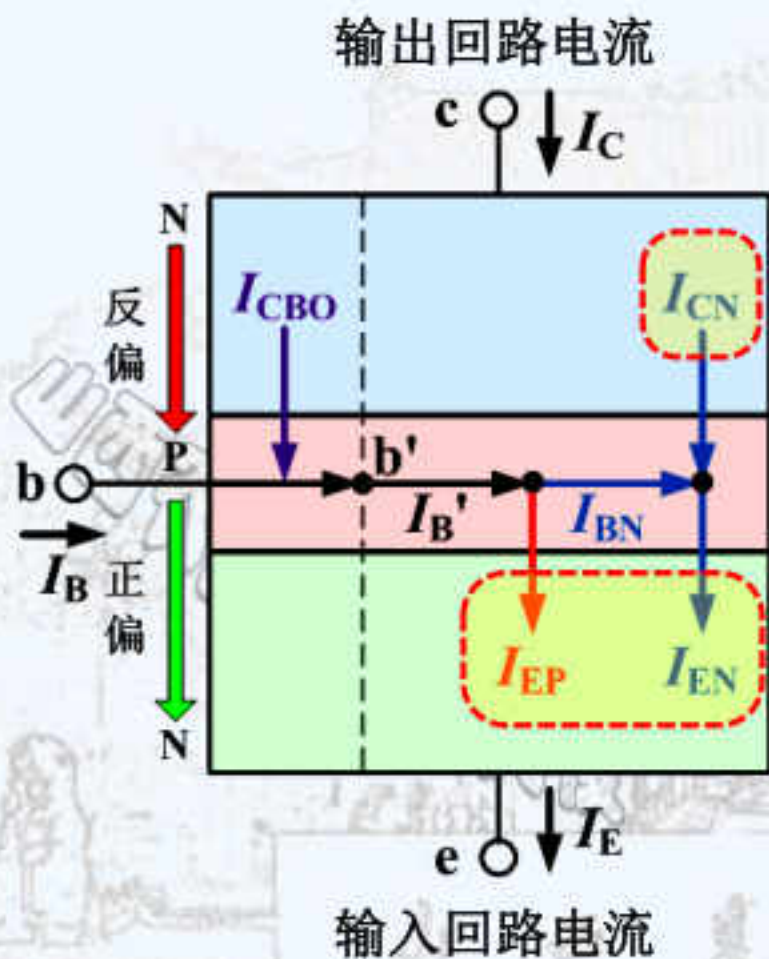


输入信号接入
基极-发射极回路

输出信号在
基极-集电极回路

• 2、共基直流电流放大系数

定义：电流 I_{CN} 与 I_E 之比称为共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ 。



$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E}$$

集电极和发射极间多子电流的比例

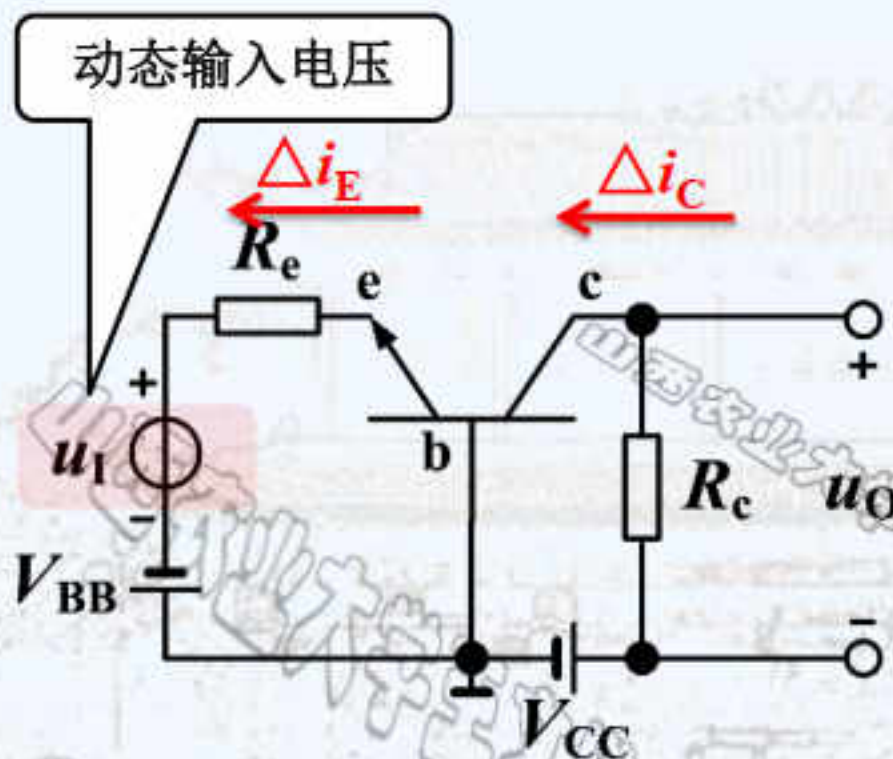
因为： $I_{CN} = I_C - I_{CBO}$

所以：
$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

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

• 3、共基交流电流放大系数

定义：电流变化量 Δi_C 与 Δi_E 之比称为共基交流电流放大系数 α 。



$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

集电极和发射极
电流变化量之比

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

当 $|\Delta i_E|$ 变化较小时，对上式

求导： $\Delta i_C = \bar{\alpha} \Delta i_E$

因此： $\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \bar{\alpha}$

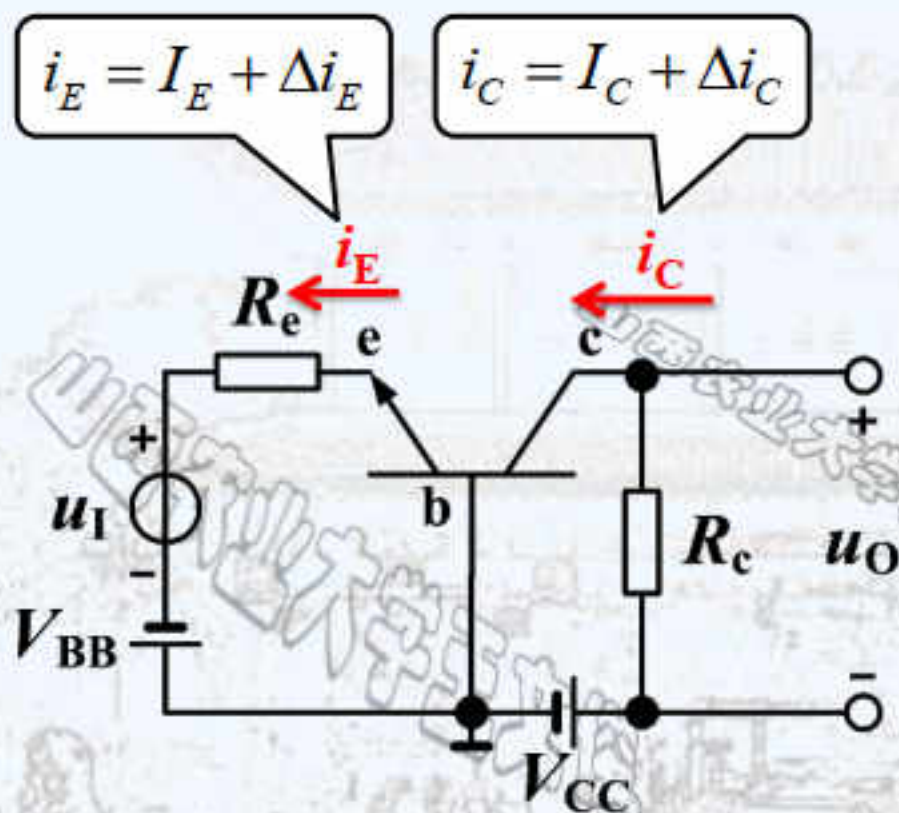
某直流量下的
直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$

代替

该直流量基础上附加动态信号的
交流电流放大系数 α

• 4、共基放大电路中的总电流

晶体管中的总电流为直流电流与交流电流之和。



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

交流: $\Delta i_C = \alpha \Delta i_E$

总电流: $i_C = I_C + \Delta i_C$
 $= \bar{\alpha} I_E + I_{CBO} + \alpha \Delta i_E$

近似: $i_C \approx \bar{\alpha} I_E + \alpha \Delta i_E$
 $= \alpha (I_E + \Delta i_E) = \alpha i_E$

• 近似计算时, 不需要对 $\bar{\alpha}$ 和 α 加以区分, 统一写为 $i_C \approx \alpha i_E$ 。

5、共射放大系数与共基放大系数的关系

直流

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_B'}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_B' = I_B + I_{CBO}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E}$$

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

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_{CN} + I_{CBO} + I_B} = \frac{I_{CN}}{I_{CN} + I_B'}$$

$$= \frac{\frac{I_{CN}}{I_B'}}{\frac{I_{CN}}{I_B'} + 1} = \frac{\bar{\beta}}{\bar{\beta} + 1}$$

交流

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

$$\Delta i_E = \Delta i_B + \Delta i_C$$

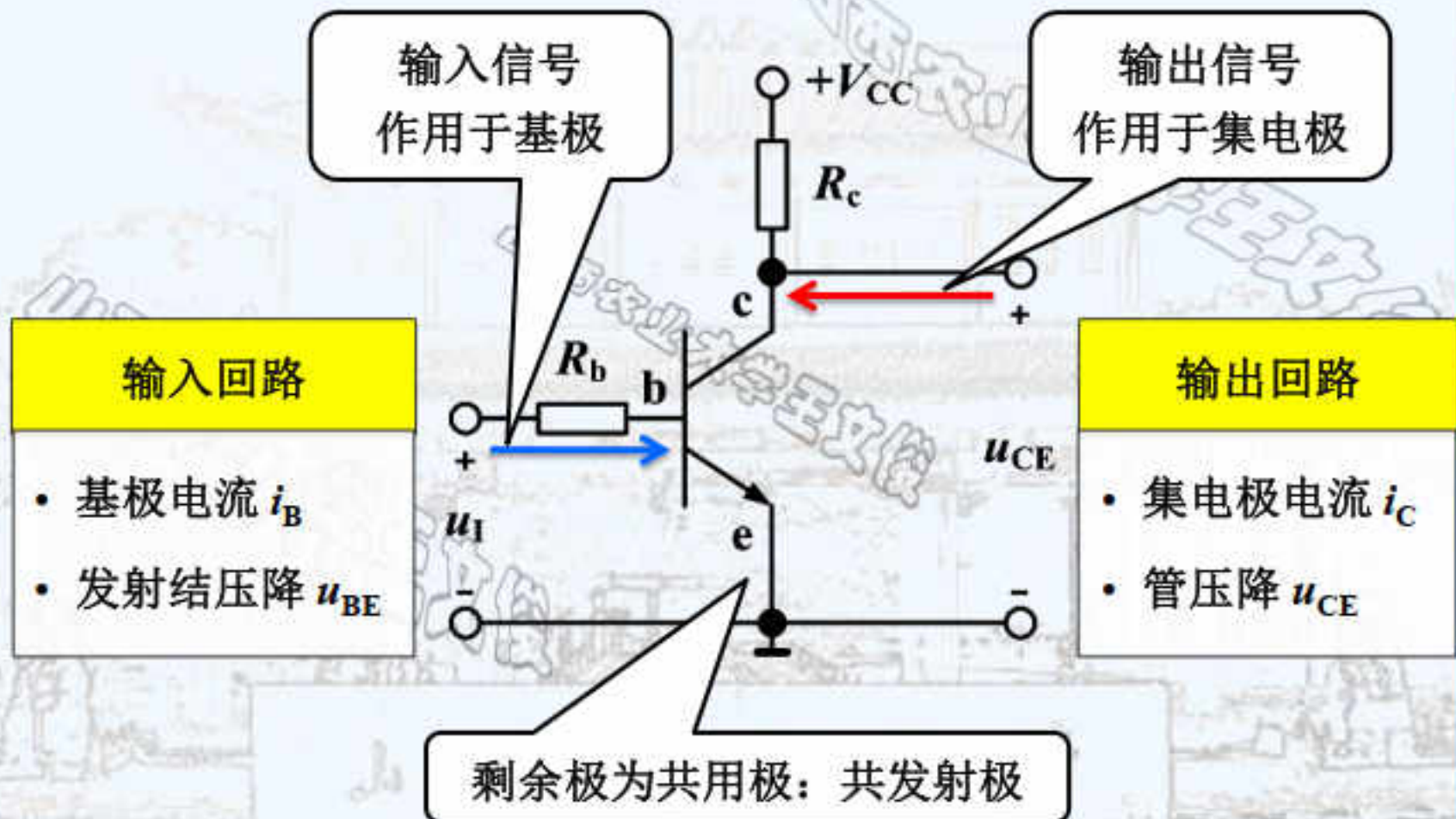
$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_C + \Delta i_B}$$

$$= \frac{\frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}}{\frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} + 1} = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

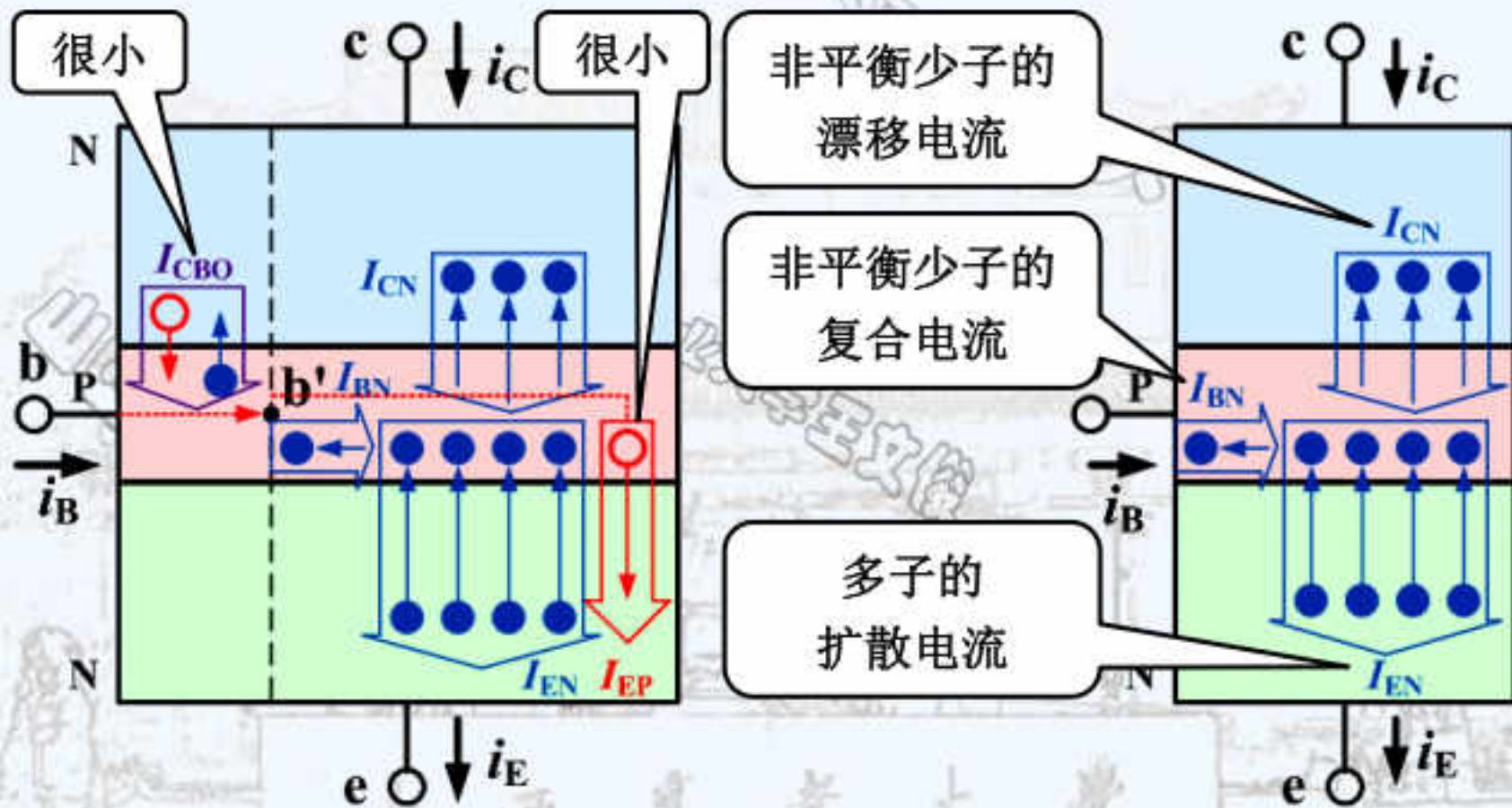
十、晶体管的共射特性曲线

• 1、共射放大电路的关键参数

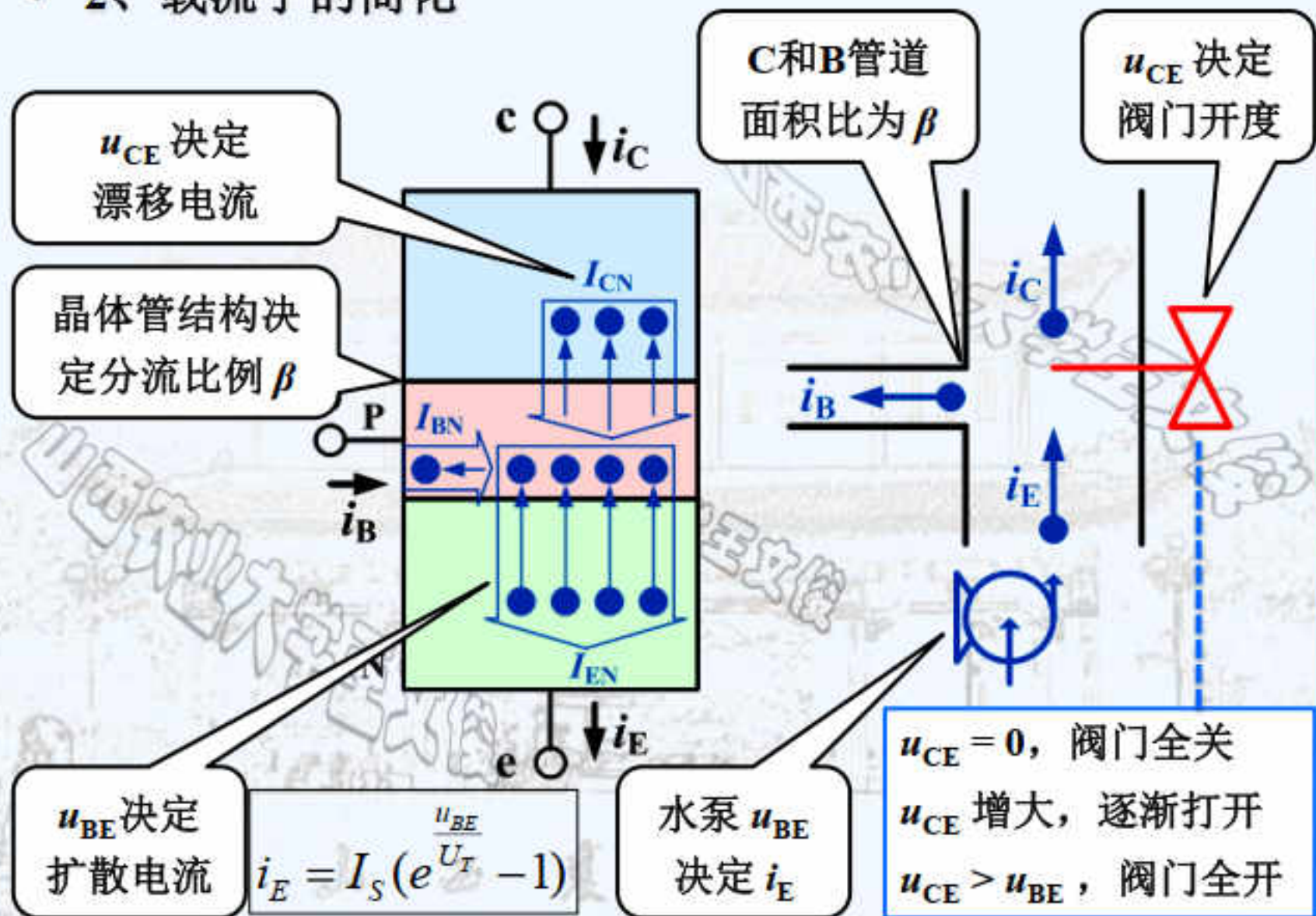


• 2、载流子的简化

为了更好的理解输入与输出特性，对晶体管中的载流子进行简化。



2、载流子的简化

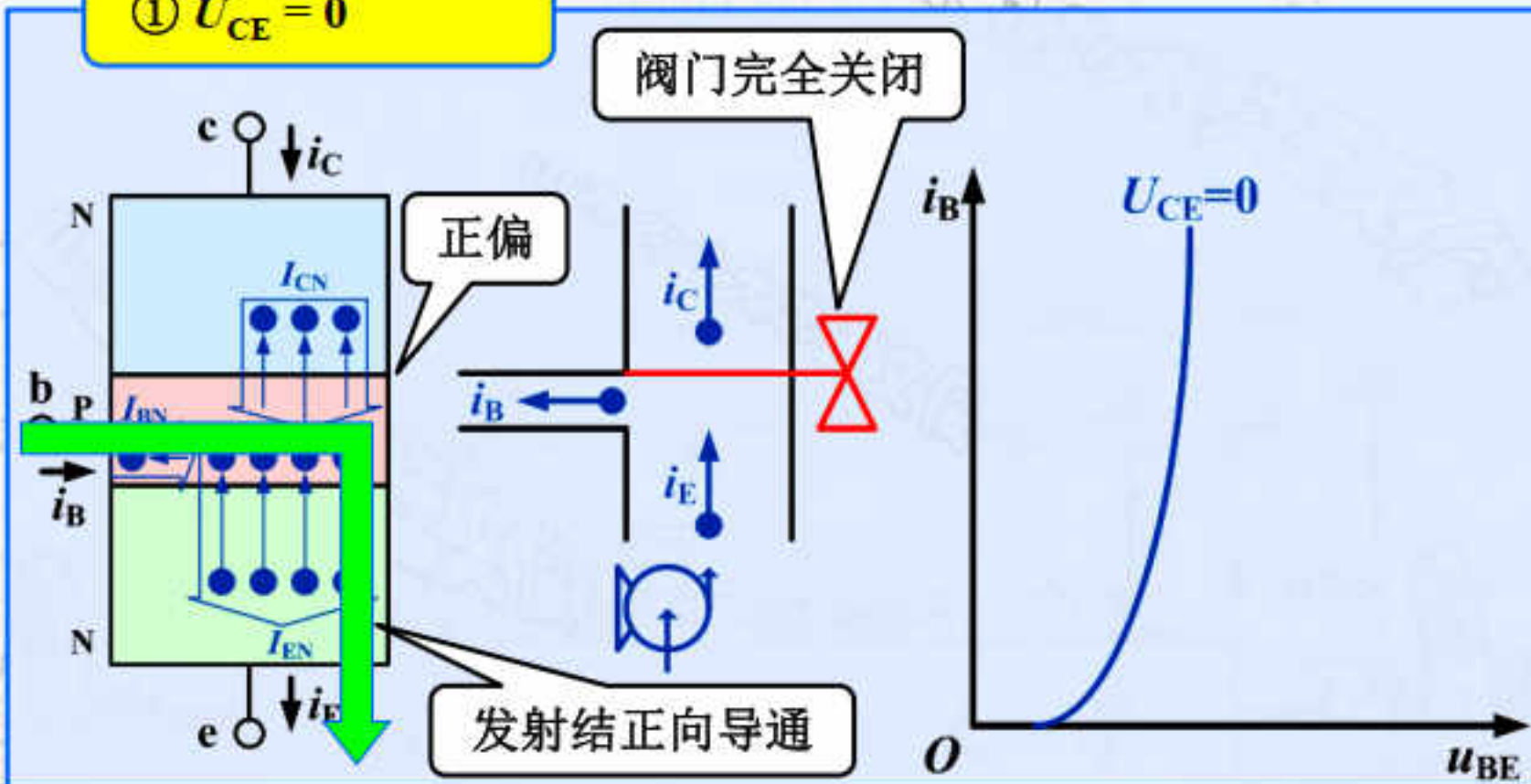


3、输入特性曲线

输出端管压降 U_{CE} 一定的情况下，输入回路的基极电流 i_B 与发射结压降 u_{BE} 间的函数关系。

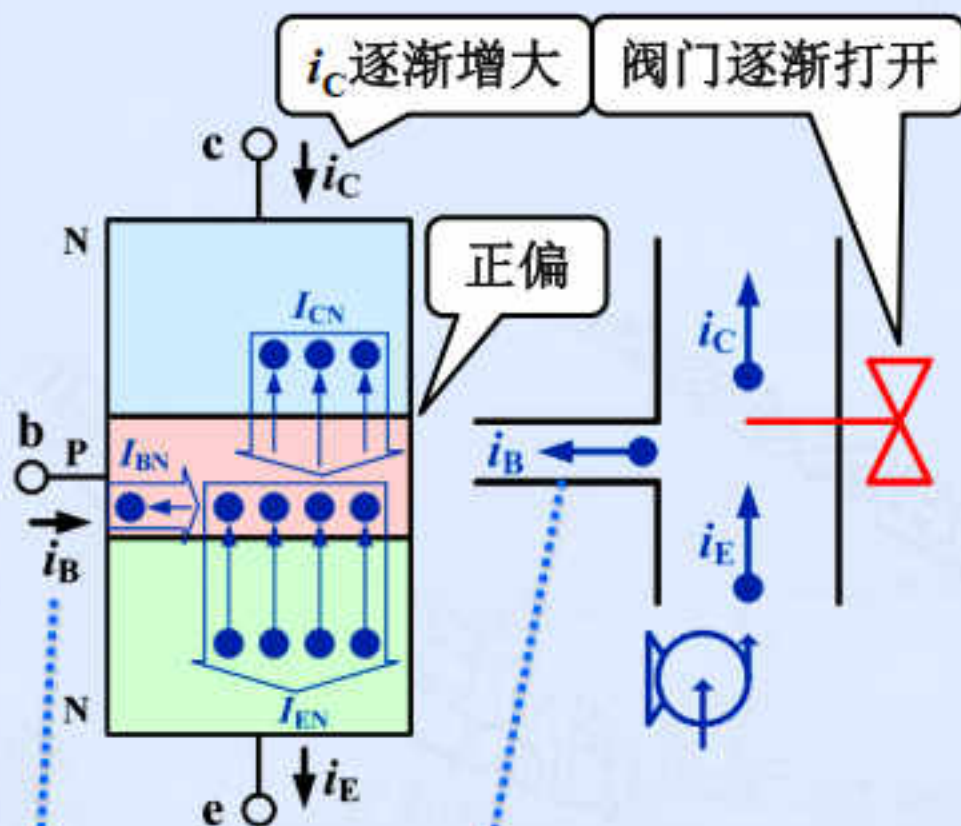
$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{const}}$$

① $U_{CE} = 0$

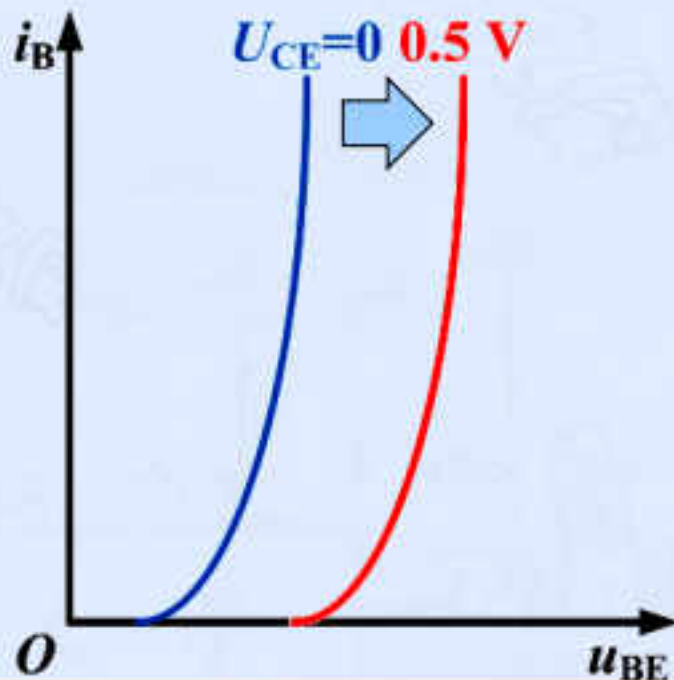


• 3、输入特性曲线

② U_{CE} 逐渐增大



u_{BE} 不变时, i_E 不变, 则 i_B 逐渐减小

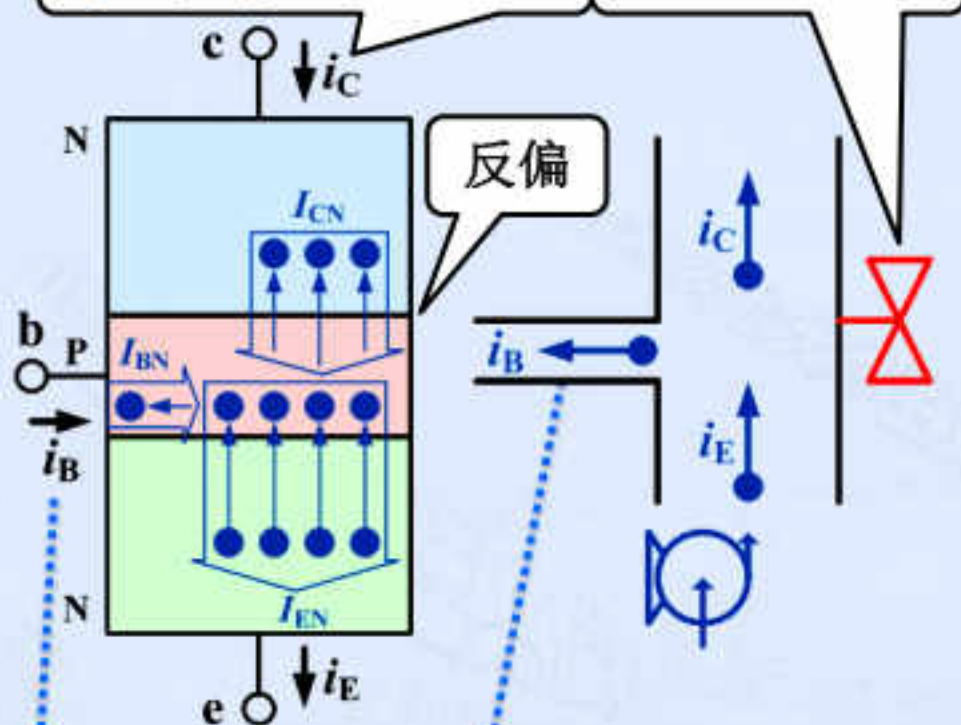


• 3、输入特性曲线

③ $U_{CE} \geq 1V$ 后

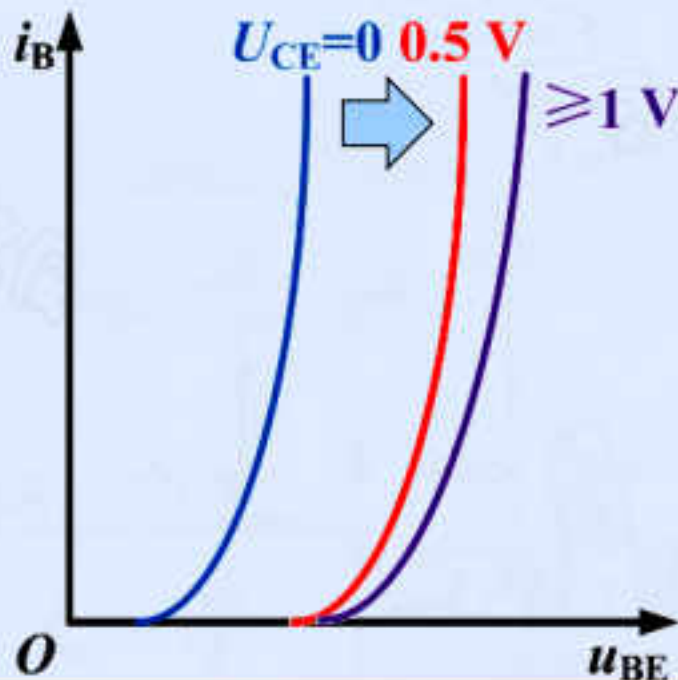
$i_C = \beta i_B$ 而不再增大

阀门完全打开



u_{BE} 不变时, i_E 不变, 则 i_B 不再减小

当 $U_{CE} \geq 1V$ 后, 输入特性曲线不再明显右移而基本重合。



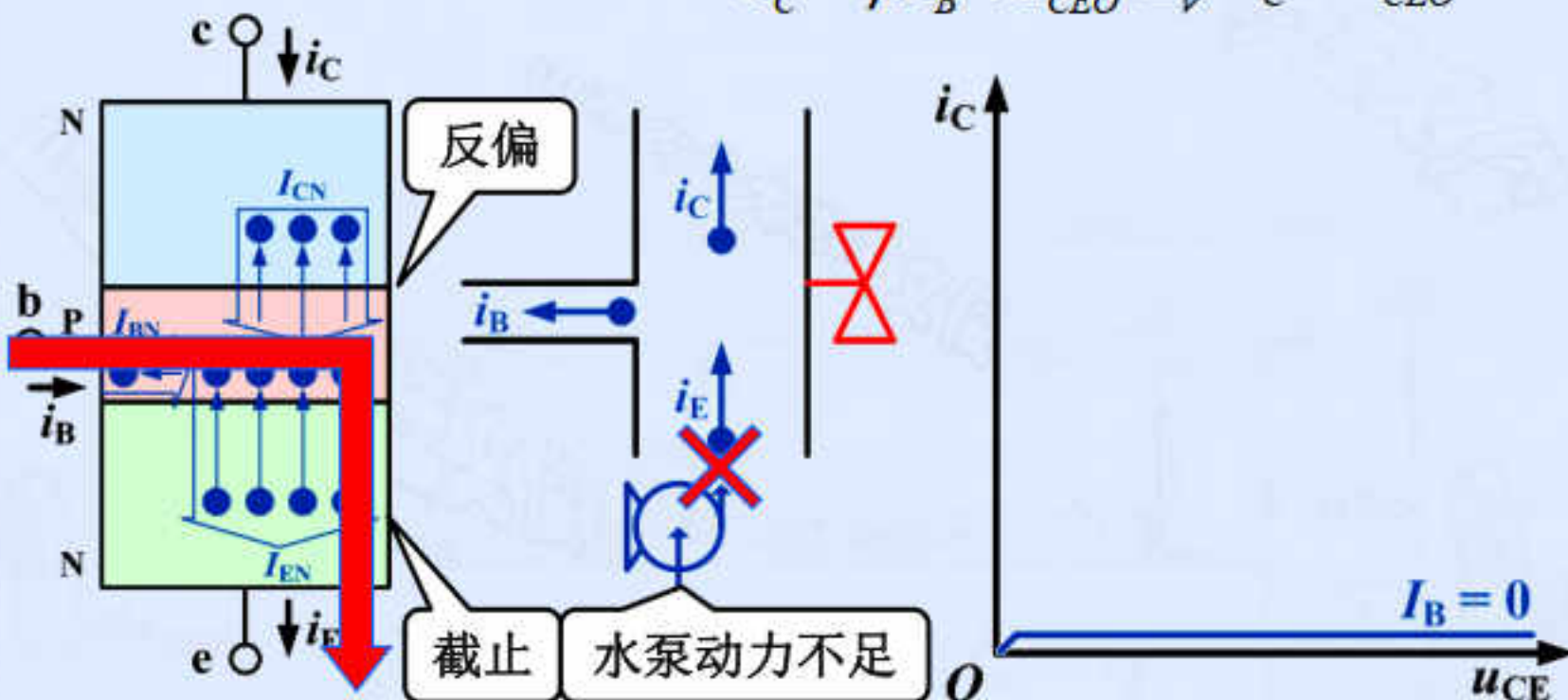
4、输出特性曲线

输入端基极电流 I_B 一定的情况下，输出回路的集电极电流 i_C 与管压降 u_{CE} 间的函数关系。

$$i_C = f(u_{CE})|_{I_B = \text{const}}$$

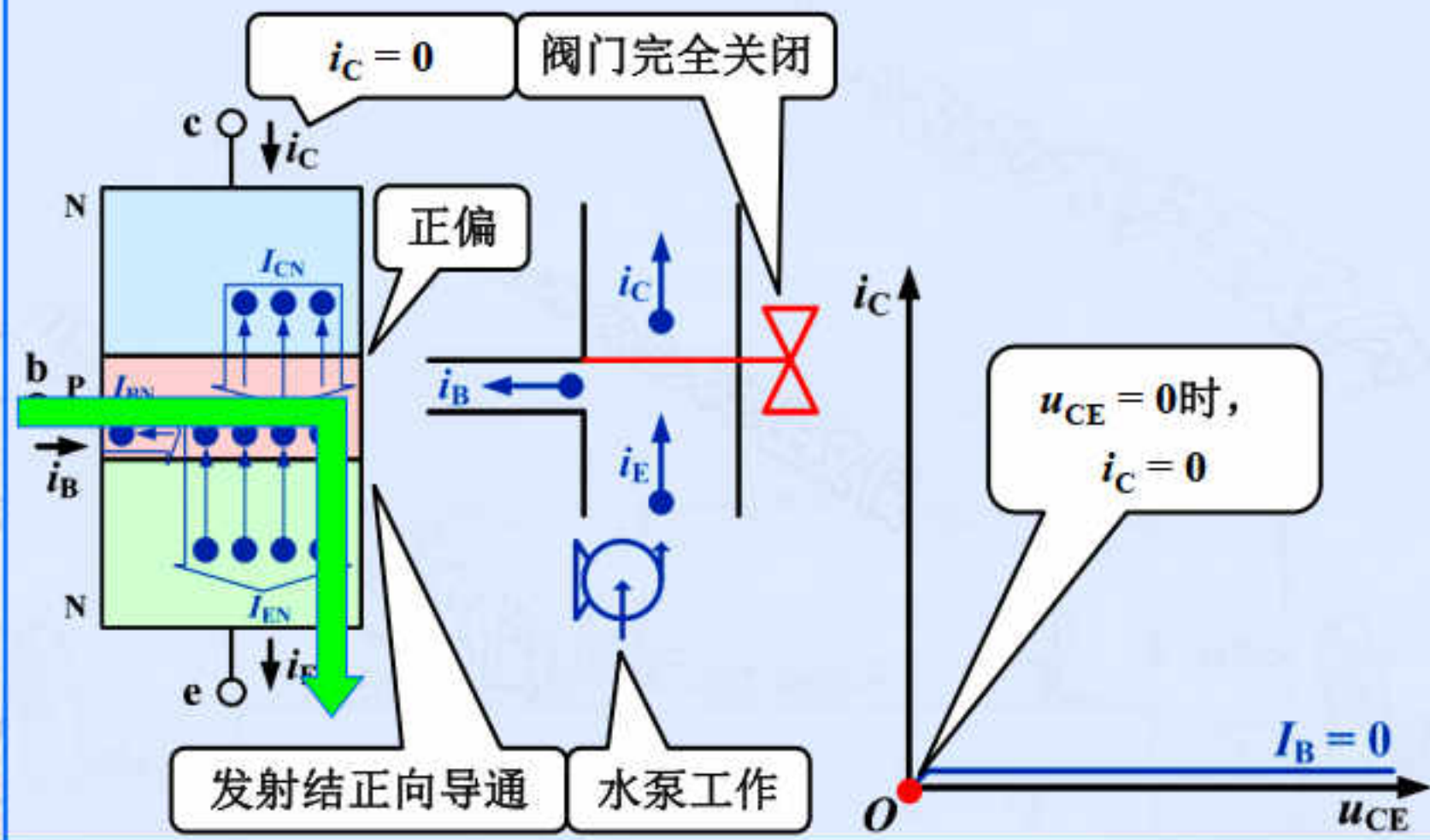
① $u_{BE} < U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$

$$I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \Rightarrow i_C = I_{CEO} \approx 0$$



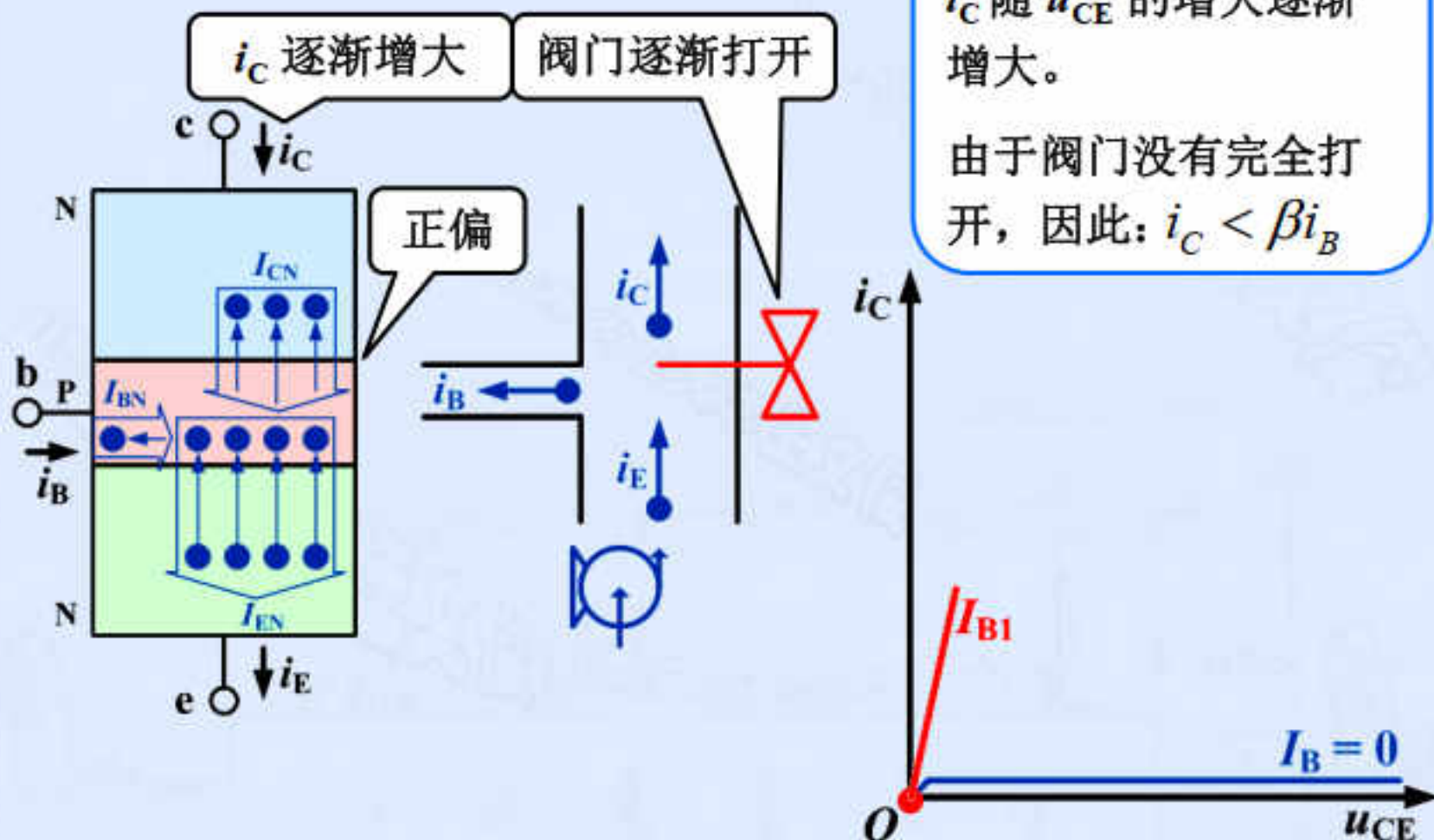
4、输出特性曲线

② $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} = 0$



4、输出特性曲线

③ $u_{BE} > U_{on}$ 且 u_{CE} 逐渐增大



4、输出特性曲线

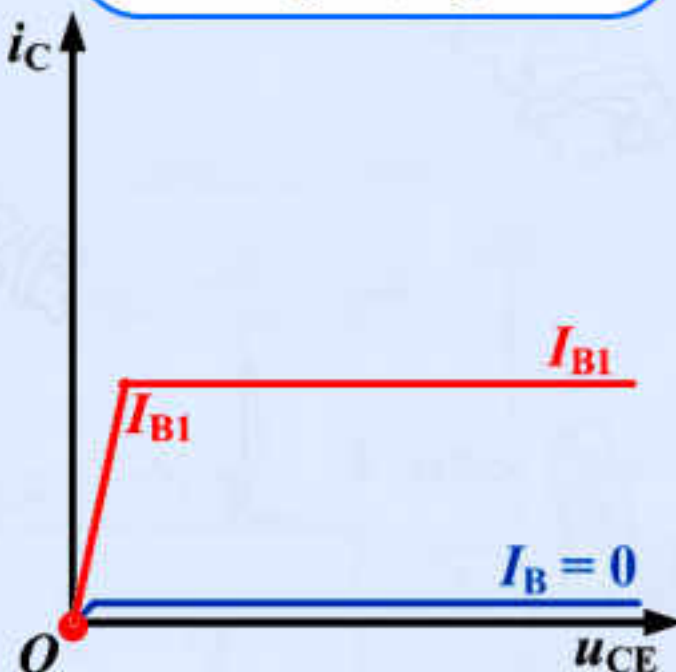
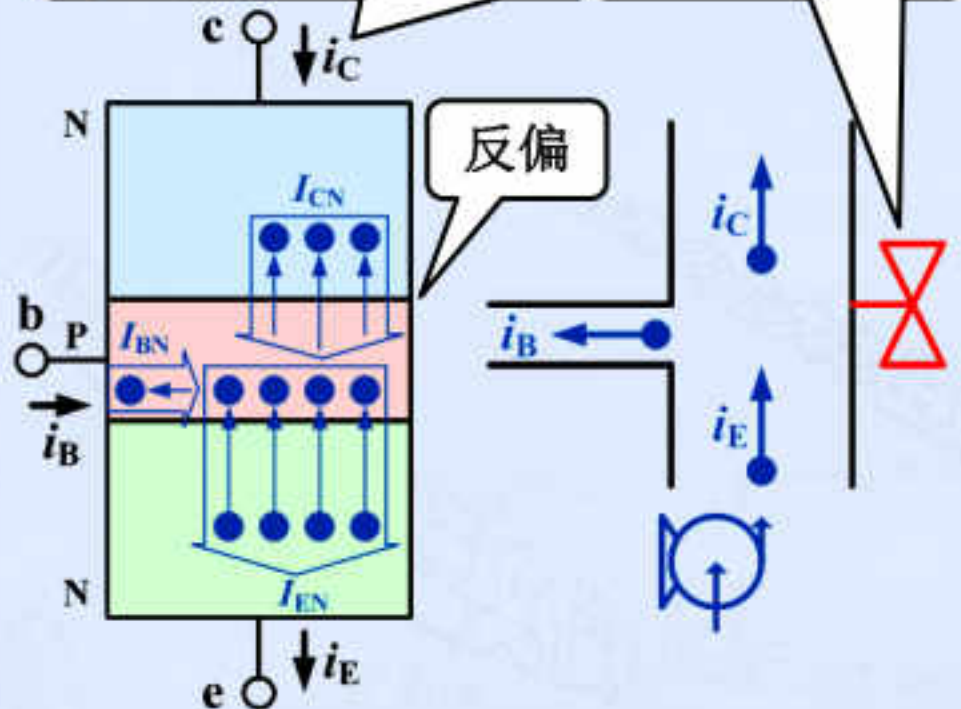
④ $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$

$i_C = \beta i_B$ 而不再增大

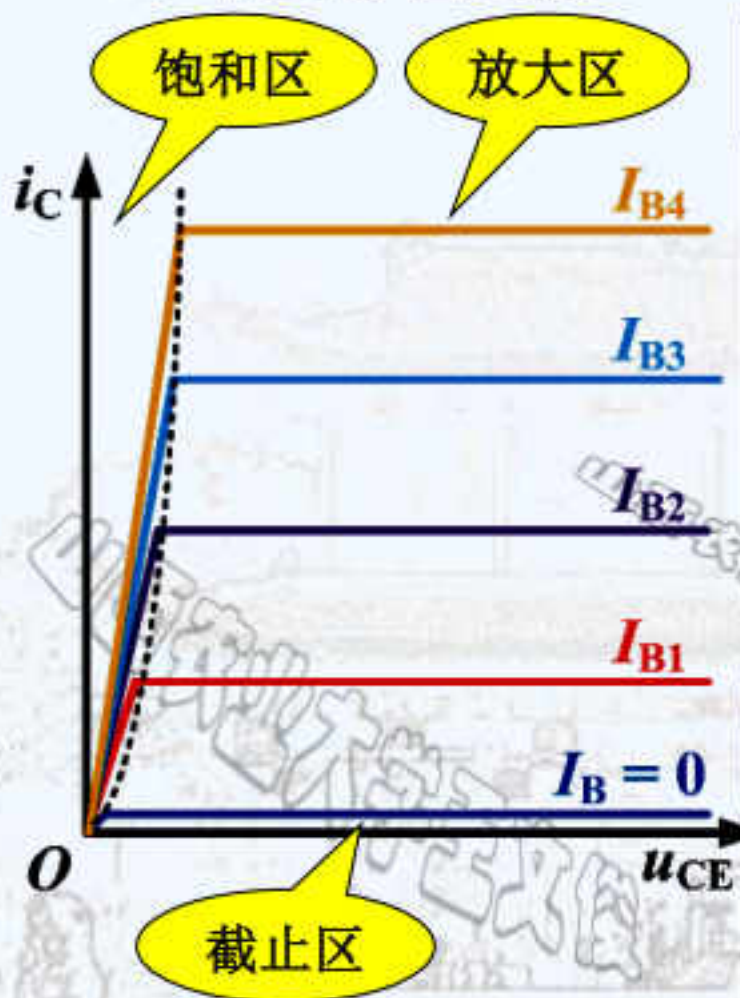
阀门完全打开

i_C 不再随 u_{CE} 的增大而增大，而是基本保持恒定不变。

此时： $i_C = \beta i_B$



• 4、输出特性曲线



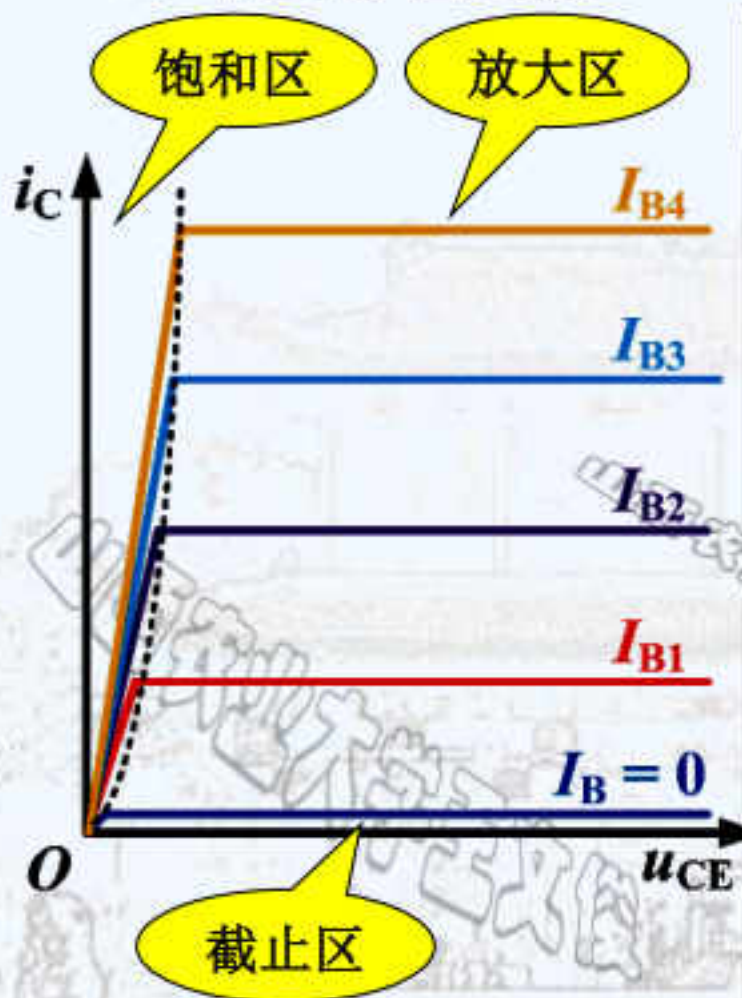
饱和区

- 条件：发射结和集电结均正偏 ($u_{BE} \geq U_{on}$ 且 $u_{CE} < u_{BE}$)
- 特点： i_C 随 u_{CE} 的增大而逐渐增大。
- 电流关系： $i_C < \beta i_B$

截止区

- 条件：发射结电压小于开启电压且集电结反偏 ($u_{BE} < U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$)
- 特点：晶体管截止，输出电流为零

• 4、输出特性曲线

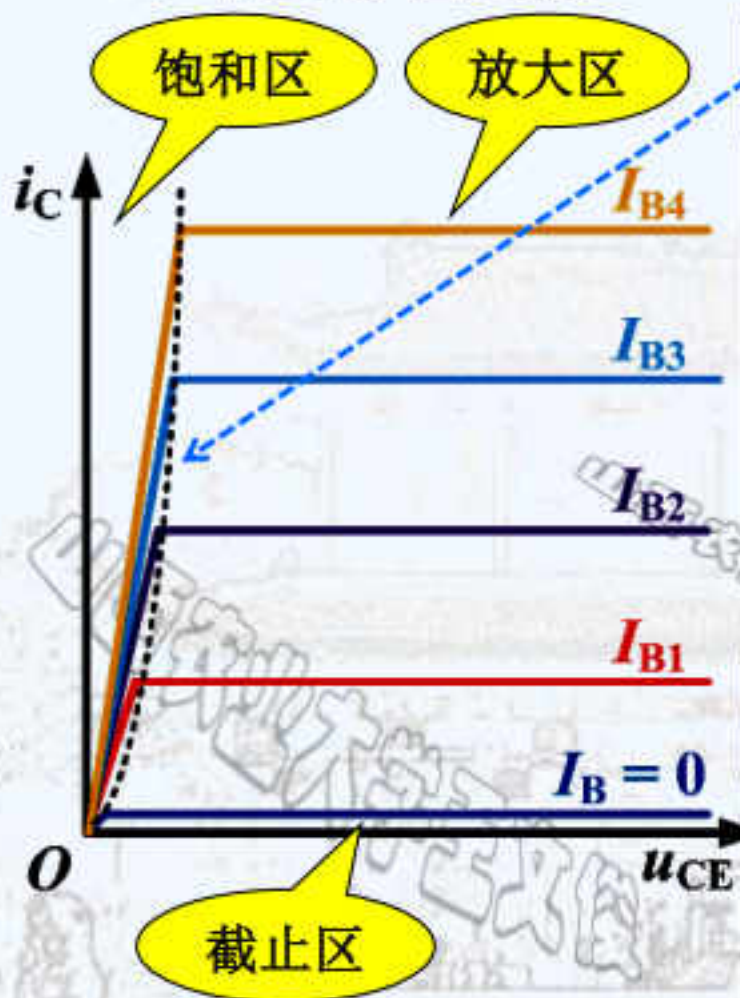


放大区

- 条件：发射结正偏，集电结反偏
($u_{BE} \geq U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$)
- 特点： i_C 几乎仅仅取决于 i_B ，而与 u_{CE} 无关。
- 放大区体现了输入电流 i_B 对输出电流 i_C 的控制作用，实现了电流放大。
 - 直流： $I_C = \bar{\beta} I_B$
 - 交流： $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$
$$\left. \begin{array}{l} I_C = \bar{\beta} I_B \\ \Delta i_C = \beta \Delta i_B \end{array} \right\} i_C = \beta i_B$$

在模拟电路中，一般情况下晶体管都工作在放大状态。

4、输出特性曲线



临界状态

- 条件：发射结正偏，集电结电压为0
($u_{BE} \geq U_{on}$ 且 $u_{CE} = u_{BE}$)
- 特点：处于饱和区和放大区的交界处，称为临界饱和或临界放大状态。

饱和导通压降 U_{CES}

- 晶体管饱和导通时c-e两端压降。
- $u_{CE} > U_{CES}$ 时，放大区， u_{CE} 不变
- $u_{CE} < U_{CES}$ 时，饱和区， $u_{CE} = U_{CES}$

• 5、晶体管工作状态的判断

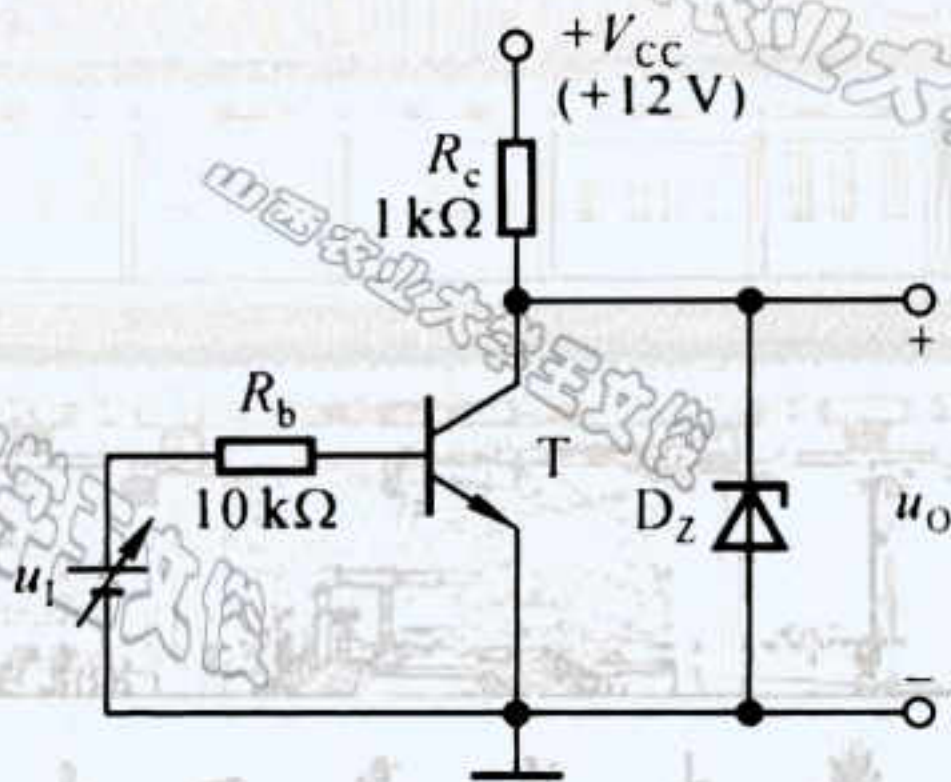
① 判断是否导通

- 根据b-e间电压 u_{BE} 判断晶体管导通还是截止。
- 若导通，则进行第②步判断。

② 判断是放大还是饱和状态

- 假设验证法：假设处于放大或饱和状态，然后计算晶体管的电压和电流，判断假设是否成立，从而确定工作状态。

- 例3: 已知晶体管 $\beta = 100$, $U_{ON} = 0.7$, 饱和管压降 $U_{CES} = 0.4$ V; 稳压管稳定电压 $U_Z = 4$ V, 正向导通电压 $U_D = 0.7$ V, 稳定电流 $I_Z = 5$ mA, 最大稳定电流 $I_{ZM} = 25$ mA。
- 试问: 当 u_I 分别为0 V、1.6 V、2.5 V时, u_O 各为多少?



- ① $u_I = 0\text{ V}$

去掉晶体管，计算b-e间电压：

$$u_{BE} = u_I = 0 < U_{ON} = 0.7\text{ V}$$

因此，晶体管截止。

假设：稳压管工作在稳压状态。
则稳压管电流：

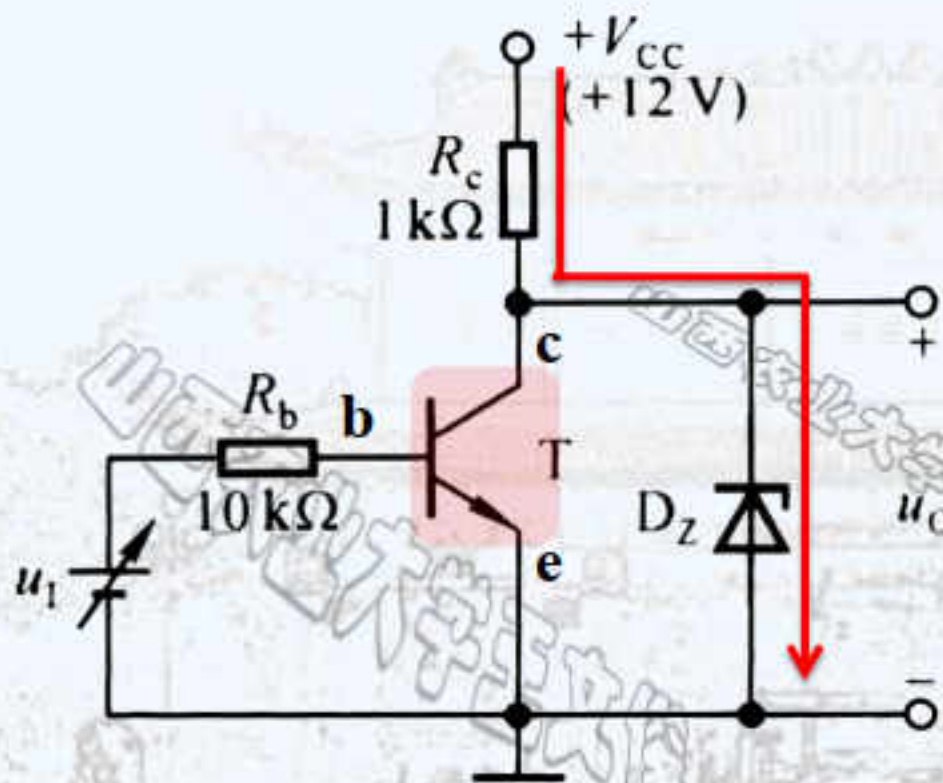
$$I_{D_Z} = \frac{V_{CC} - U_Z}{R_c} = 8\text{ mA}$$

$$I_Z \leq I_{D_Z} = 8\text{ mA} \leq I_{ZM}$$

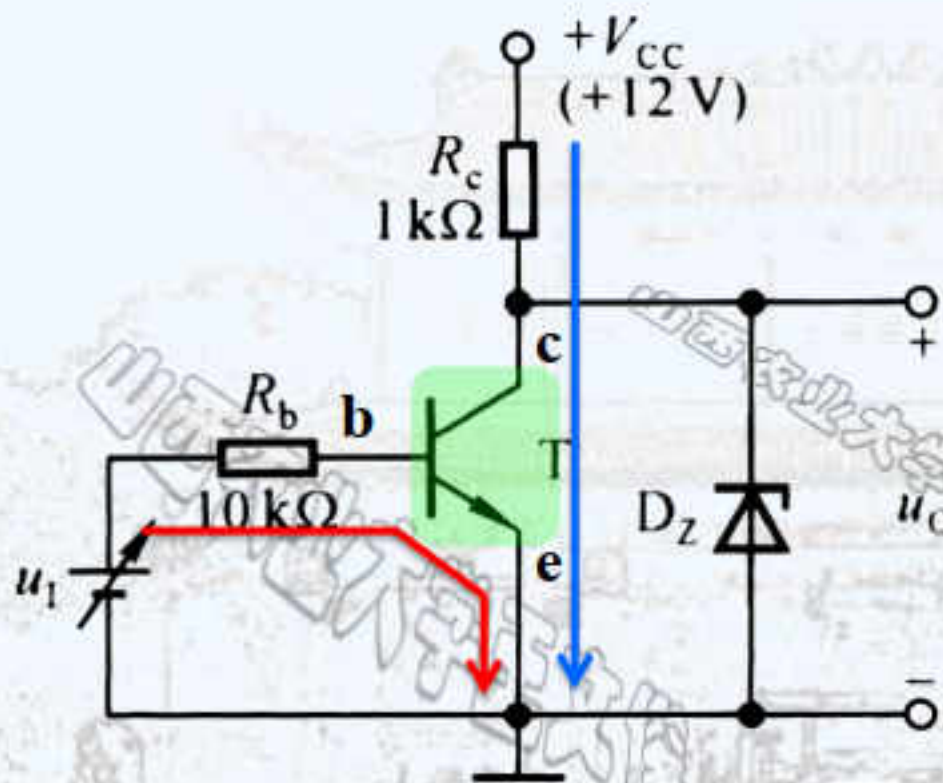
因此，稳压管工作在稳压状态。

输出电压：

$$u_O = U_Z = 4\text{ V}$$



- ② $u_I = 1.6\text{ V}$



去掉晶体管，计算**b-e**间电压：

$$u_{BE} = u_I = 1.6\text{ V} > U_{ON} = 0.7\text{ V}$$

因此，晶体管导通。

假设：晶体管工作在放大状态。
去掉稳压管，则电流：

$$I_B = \frac{u_I - U_{ON}}{R_b} = 0.09\text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 9\text{ mA}$$

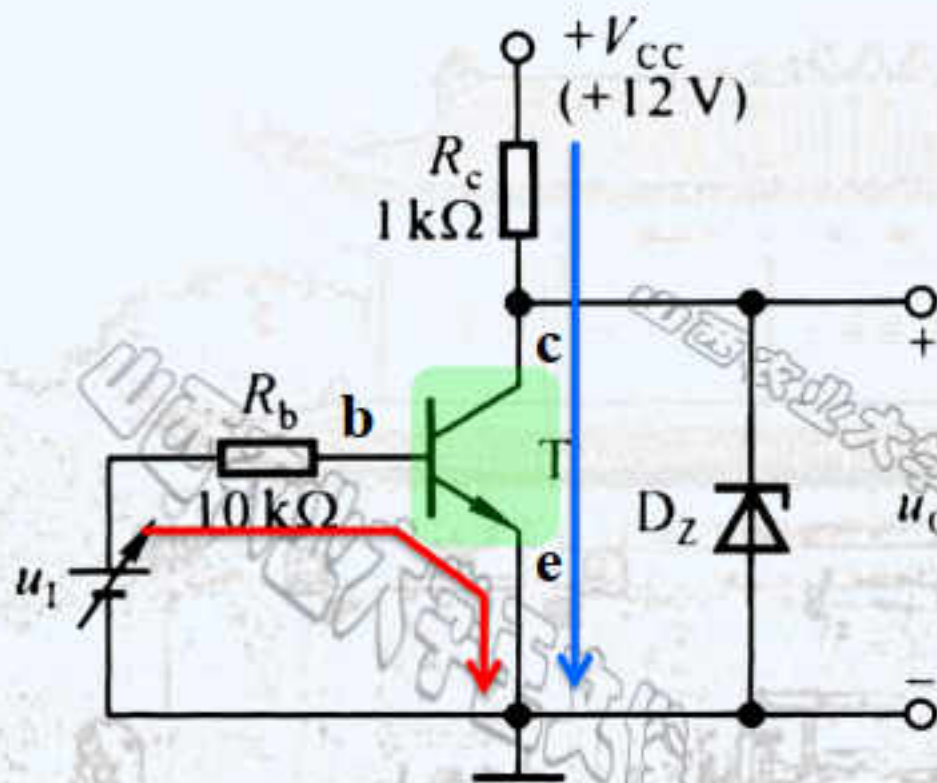
$$u_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = 3\text{ V} > U_{CES}$$

因此，晶体管工作在放大状态。

稳压管截止，输出电压：

$$u_O = u_{CE} = 3\text{ V}$$

- ③ $u_I = 2.5\text{ V}$



去掉晶体管，计算**b-e**间电压：

$$u_{BE} = u_I = 2.5\text{ V} > U_{ON} = 0.7\text{ V}$$

因此，晶体管导通。

假设：晶体管工作在放大状态。
去掉稳压管，则电流：

$$I_B = \frac{u_I - U_{ON}}{R_b} = 0.18\text{ mA}$$

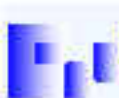
$$I_C = \beta I_B = 18\text{ mA}$$

$$u_{CE} = V_{CC} - I_C R_c = -6\text{ V} < U_{CES}$$

因此，晶体管工作在饱和状态。

稳压管截止，输出电压：

$$u_O = U_{CES} = 0.4\text{ V}$$



十一、晶体管的主要参数

- 1、三类主要参数



• 2、直流参数

共射直流电流放大系数 $\bar{\beta}$

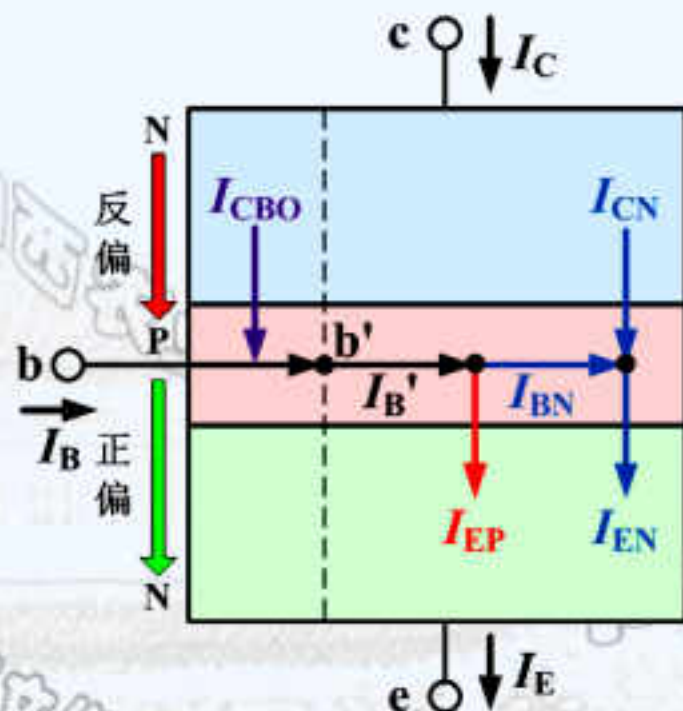
$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I_B'} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B}$$

• 当 $I_C \gg I_{CEO}$ 时, $\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B}$

共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

• 忽略 I_{CBO} 时, $\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E}$

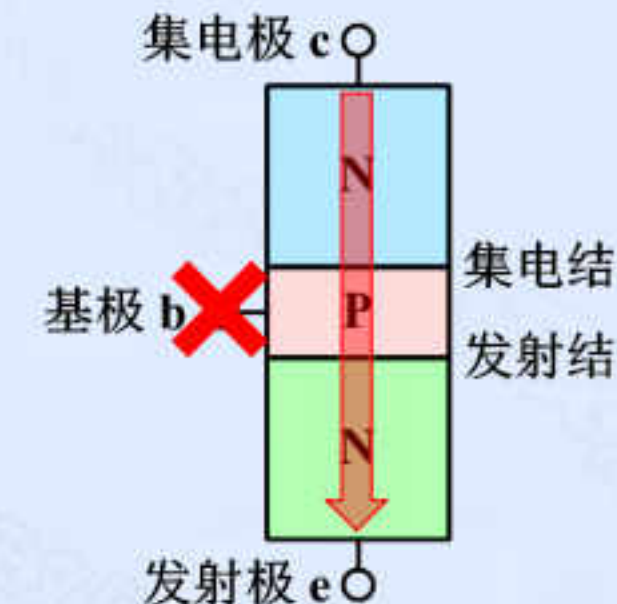
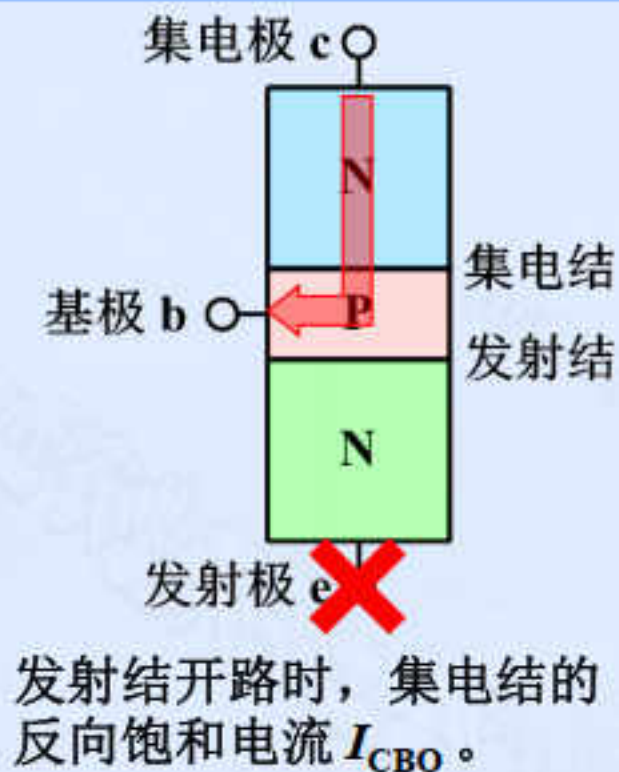


两者间关系

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

• 2、直流参数

极间反向电流



基极开路时，集电极与发射极间的穿透电流 I_{CEO} 。

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

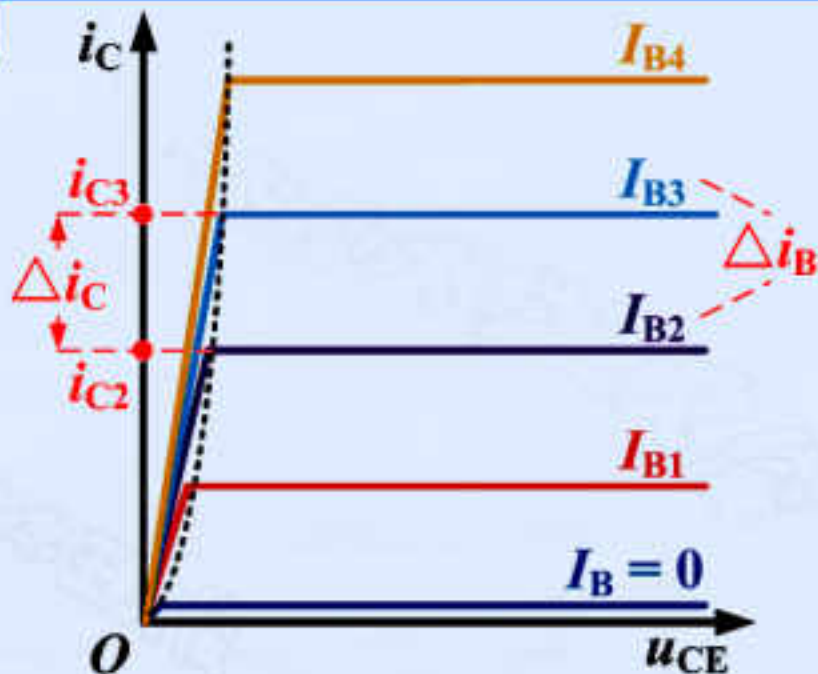
同一型号的管子，反向电流越小，性能越稳定。

3、交流参数

共射交流电流放大系数 β

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

- 选用管子时, β 要适中。
- 太小则放大能力不强;
- 太大则温度稳定性差。



共基交流电流放大系数 α

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

两者间关系

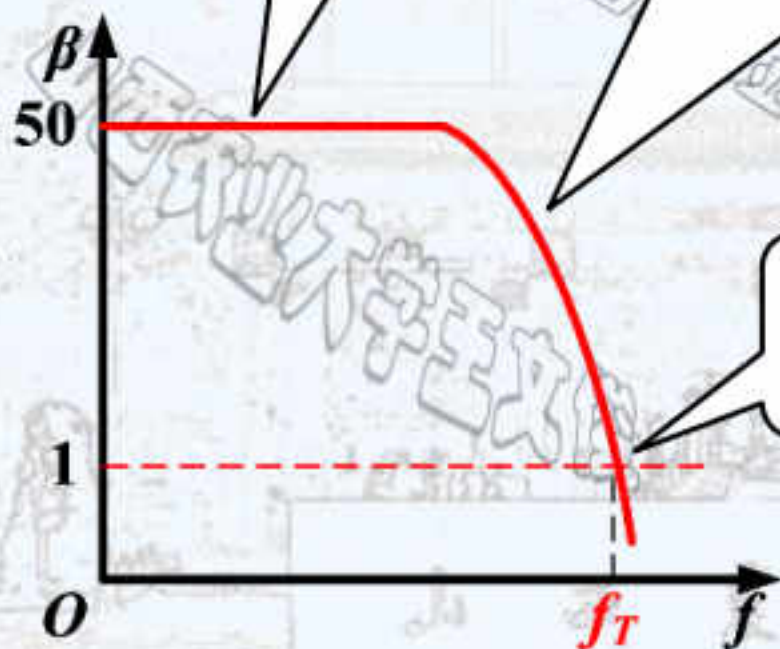
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

• 3、交流参数

晶体管中PN结存在结电容，交流放大系数 β 是所加信号频率 f 的函数。

信号频率较低时， β 基本保持不变。

信号频率高到一定程度时，集电极电流与基极电流之比 β 数值下降，并且产生相移。

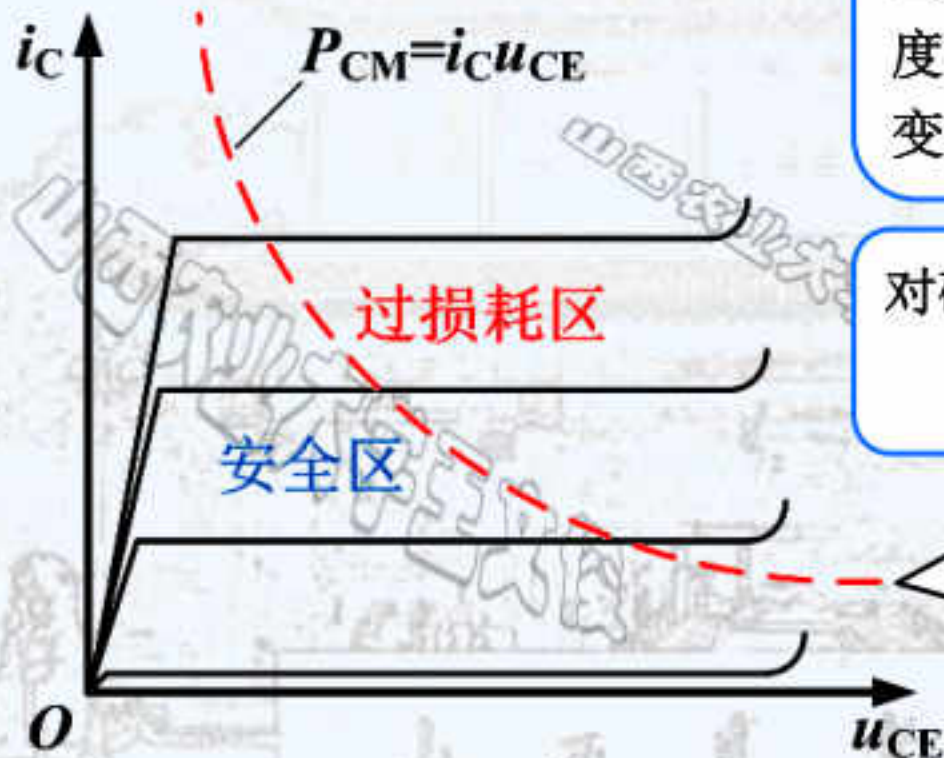


共射交流电流放大系数 β 下降为1时，对应的信号频率 f_T 称为特征频率。

• 4、极限参数

为使晶体管安全工作，需对其电压、电流、功率损耗进行限制。

最大集电极耗散功率 P_{CM}



P_{CM} 决定晶体管的温升。

当硅管温度大于 150°C ，锗管温度大于 70°C 时，管子特性明显变坏，甚至烧坏。

对确定型号晶体管， P_{CM} 为定值。

$$P_{CM} = i_C u_{CE} = \text{const}$$

P_{CM} 为输出特性平面中双曲线的一条，将空间分为安全区和过损耗区两部分。

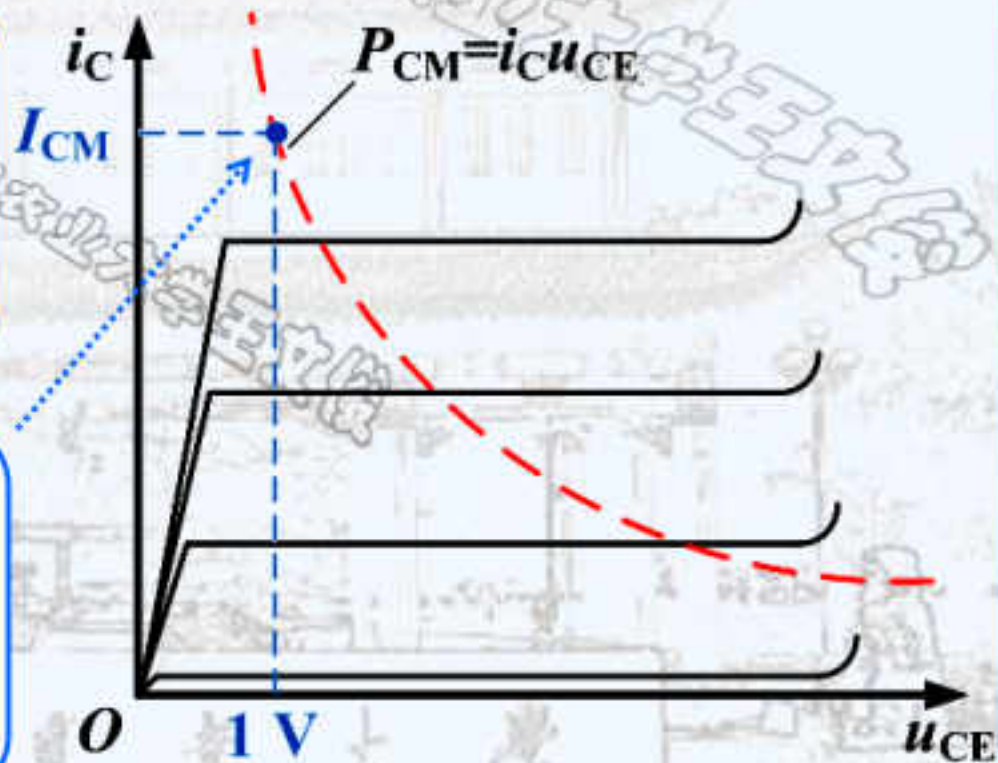
• 4、极限参数

最大集电极电流 I_{CM}

i_C 在相当大的范围内 β 值基本不变。

当 i_C 的数值增大到一定程度时， β 值将减小。
使 β 值明显减小的 i_C 值，
即为最大集电极电流 I_{CM} 。

对小功率管：
当 $u_{CE} = 1\text{ V}$ 时，
由 $P_{CM} = i_C u_{CE}$ 得出的 i_C
即为 I_{CM} 。



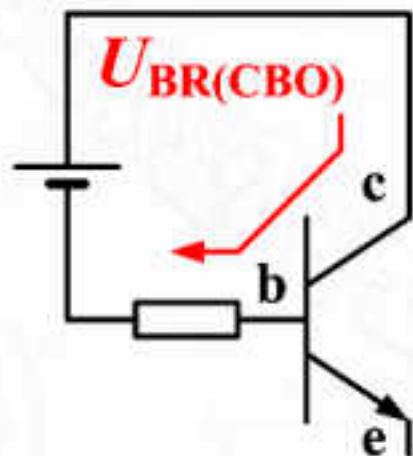
4、极限参数

极间反向击穿电压

晶体管某一电极开路时，另外两个电极间所允许的最高反向电压。

$U_{BR(CBO)}$

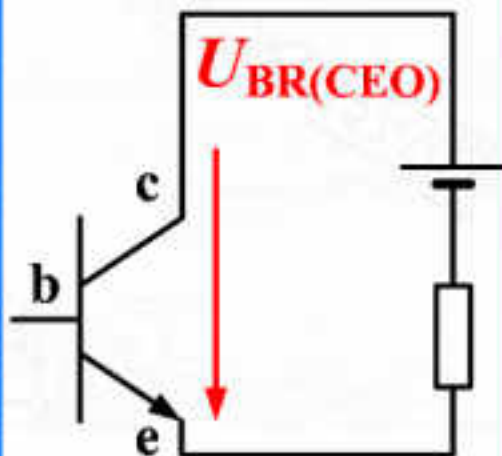
- 发射极e开路时，集电极c与基极b间的反向击穿电压。



- 几十伏到上千伏

$U_{BR(CEO)}$

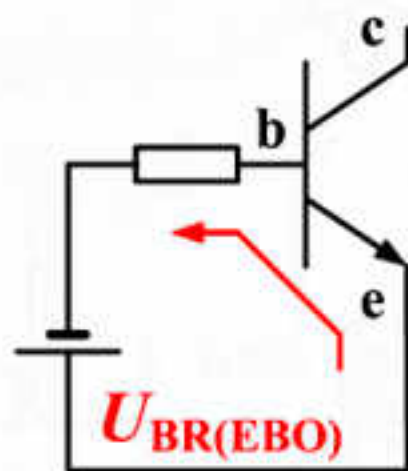
- 基极b开路时，集电极c与发射极e间的反向击穿电压。



- $U_{BR(CEO)} < U_{BR(CBO)}$

$U_{BR(EBO)}$

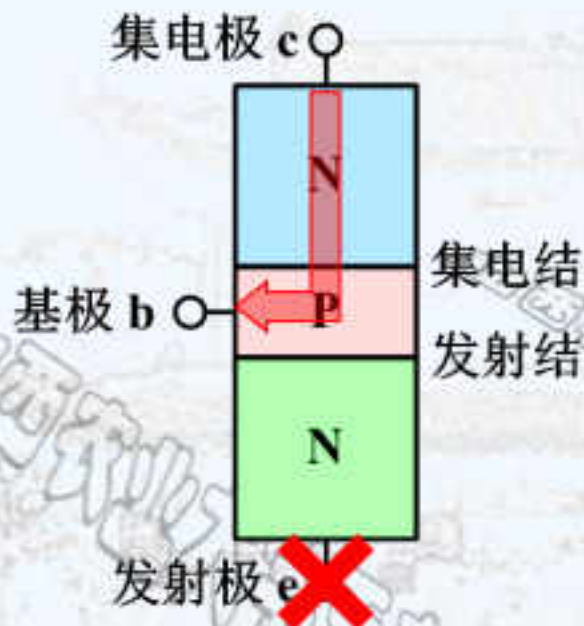
- 集电极c开路时，发射极e与基极b间的反向击穿电压。



- 1伏以下到几伏

十二、温度对晶体管的影响

• 1、温度对 I_{CBO} 的影响



发射结开路时，集电结的反向饱和电流 I_{CBO} 。

温度升高，热运动加剧

↓
少子浓度增大

↓
少子漂移电流增大

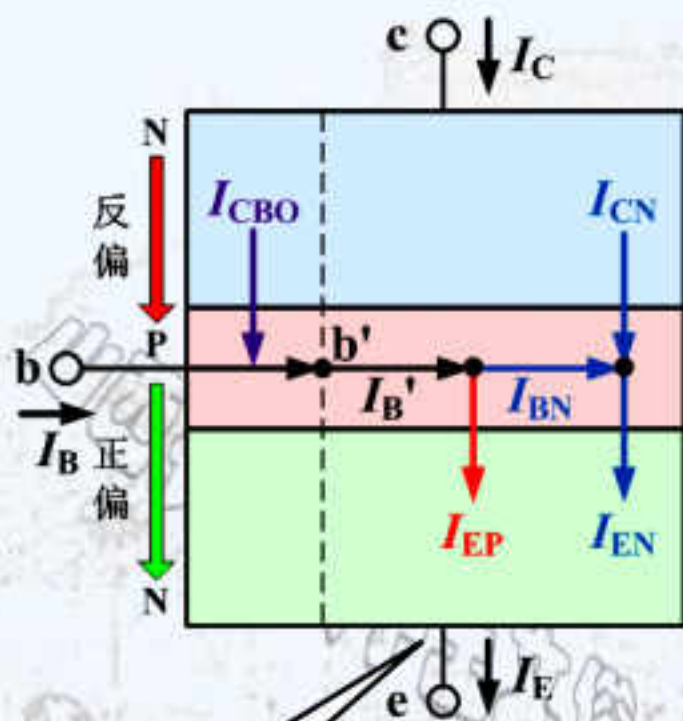
↓
集电结反向饱和电流 I_{CBO} 增大

温度每升高 10°C ， I_{CBO} 约增大一倍。

由于 $I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$ ，温度变化时， I_{CEO} 也会相应变化。

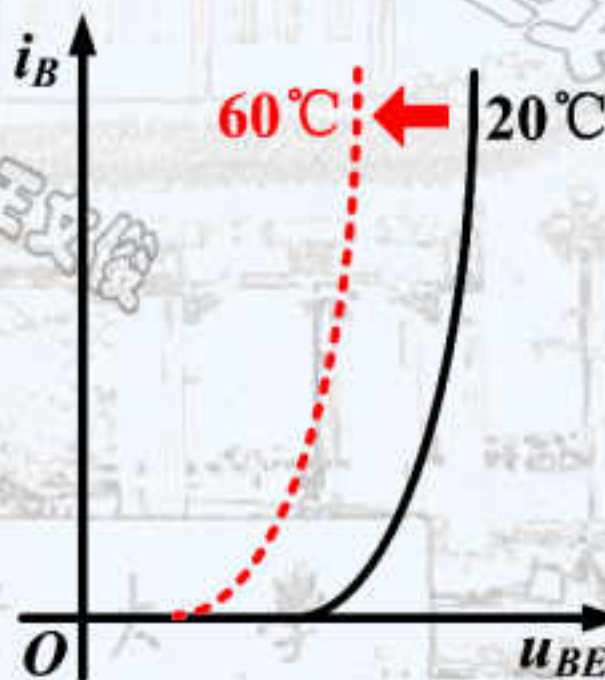
• 2、温度对输入特性的影响

与二极管伏安特性类似，温度升高时，正向特性将左移。



u_{BE} 不变, $T \uparrow \rightarrow I_S \uparrow \rightarrow i_E \uparrow \rightarrow i_B \uparrow$

i_B 不变, T 升高 1°C , u_{BE} 减小 $2\sim 2.5\text{ mV}$



u_{BE} 决定
扩散电流

$$i_E = I_S \left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

3、温度对输出特性的影响

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

温度升高，多子运动变得剧烈，多子穿越基区时复合概率变小，到达集电区的数量增多。

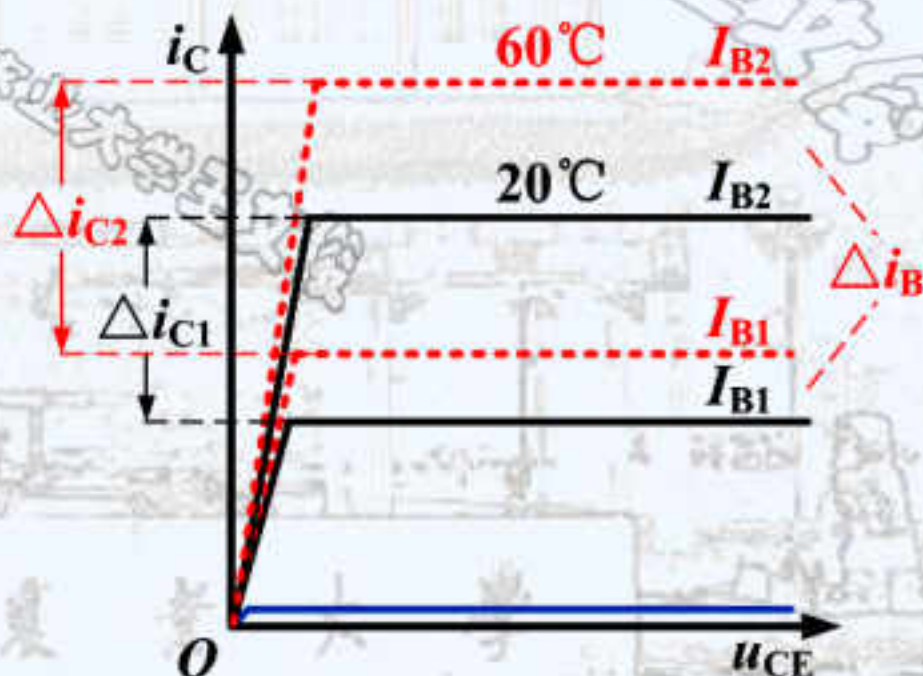
β 增大

I_{CEO} 增大

I_C 增大

在相同的 I_B 情况下，集电极电流 I_C 随温度上升而增大。

晶体管的 β 随温度的升高而增大。
温度每上升 1°C ， β 值约增大 $0.5 \sim 1\%$ 。



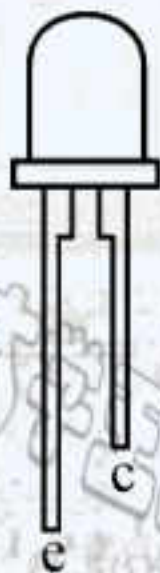
十三、光电三极管

• 1、光电三极管简介

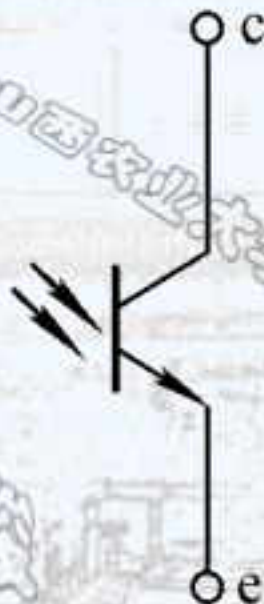
光电三极管依据光照的强度来控制集电极电流的大小。



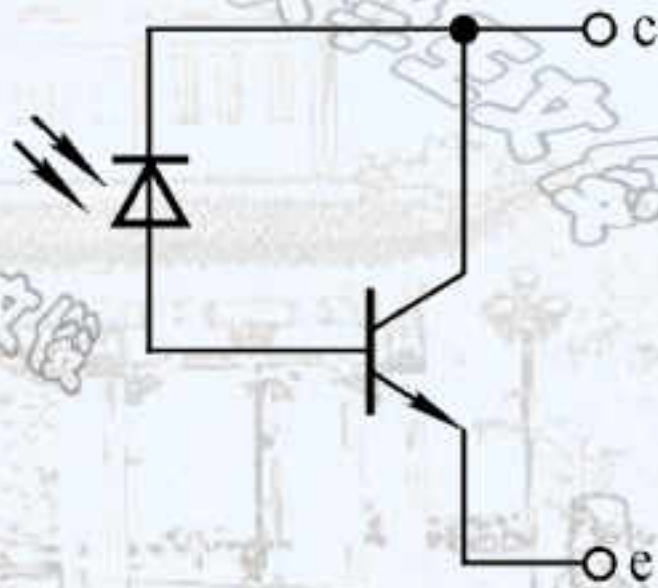
实物



外形



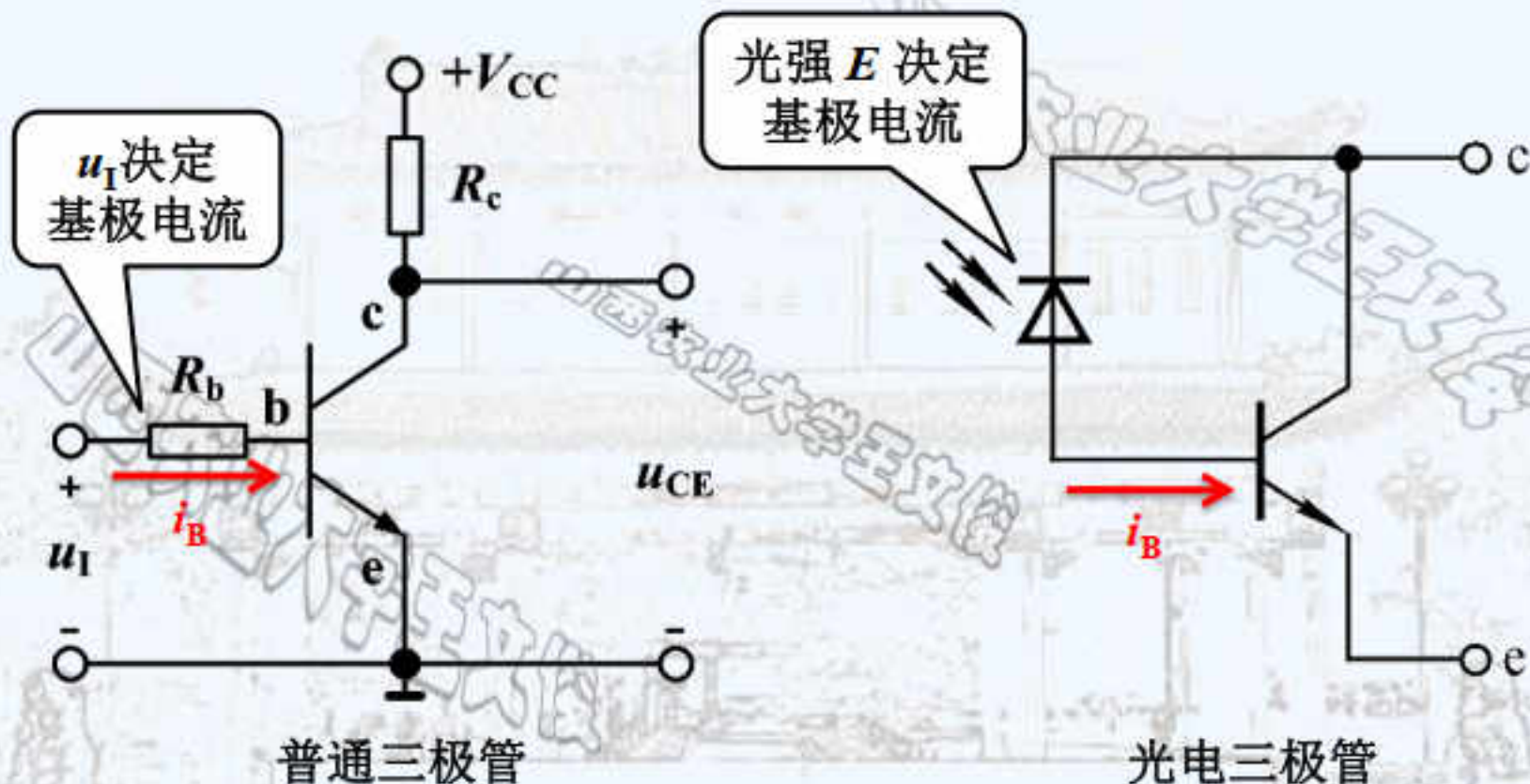
符号



等效电路

• 2、光电三极管的输出特性曲线

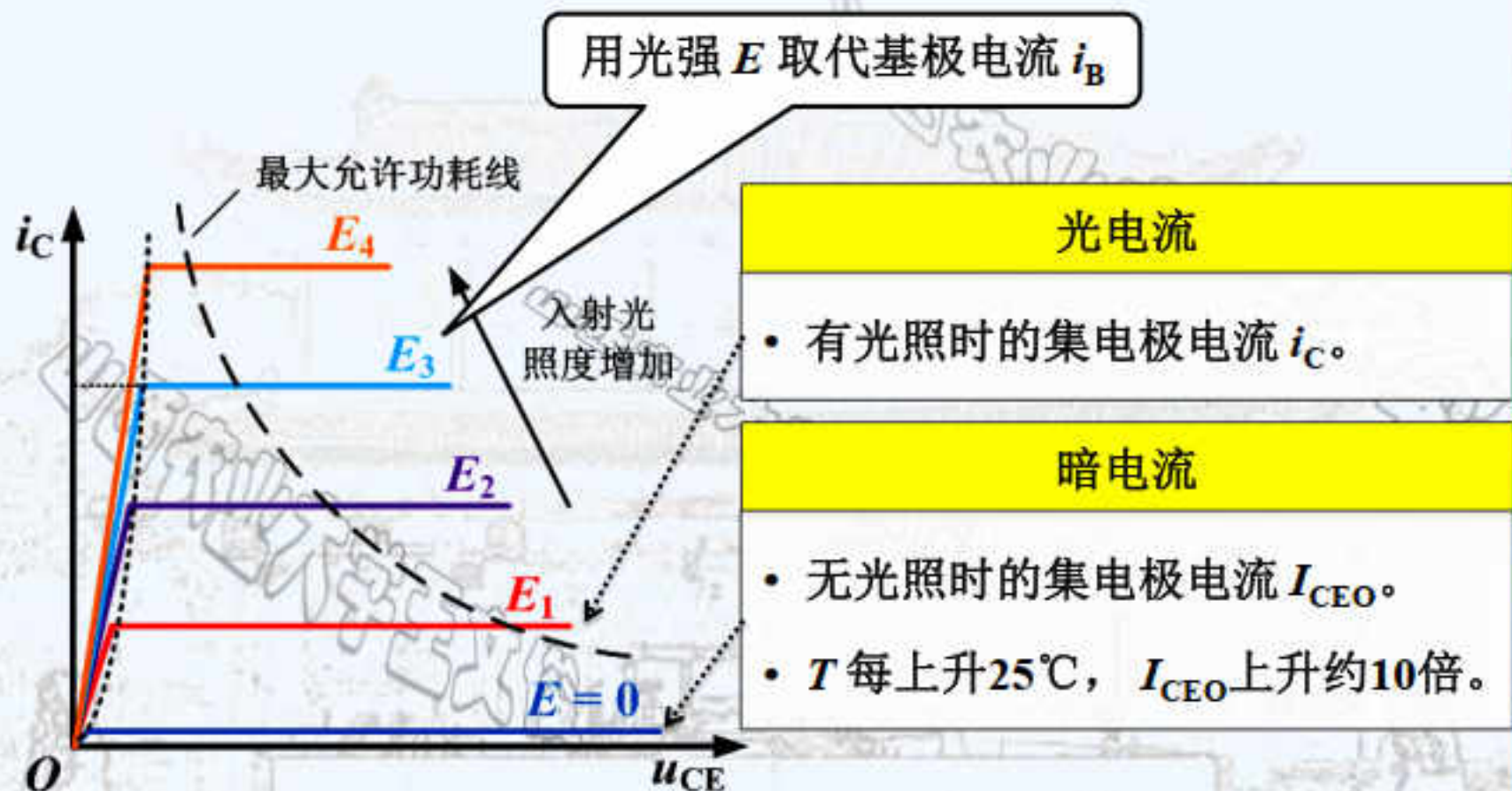
光电三极管通过光照强度 E 来控制基极电流 i_B 的大小。



除基极电流的来源不同外，光电三极管在其他方面与晶体管类似。

• 2、光电三极管的输出特性曲线

光电三极管依据光照强度 E 来控制集电极电流 i_C 的大小。

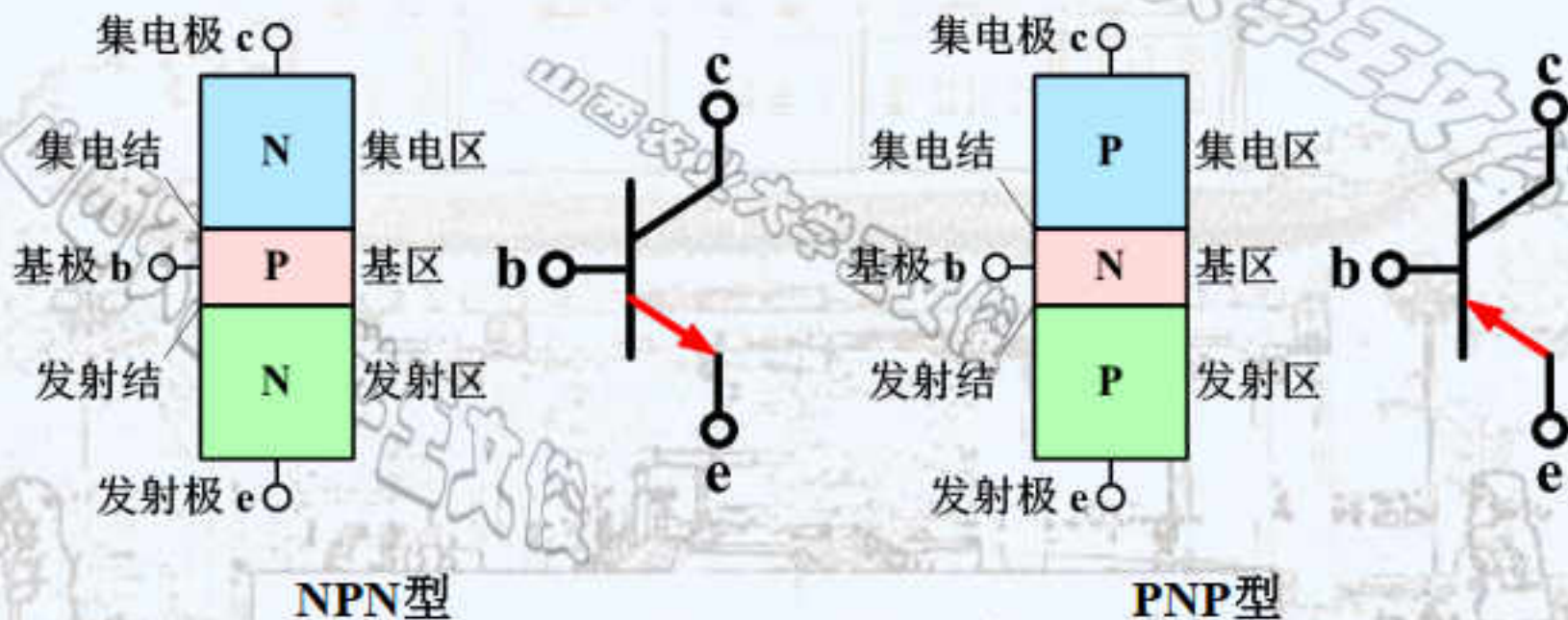


当 u_{CE} 足够大时, i_C 几乎仅仅取决于入射光强 E , 类似晶体管放大区。

十四、NPN型与PNP型晶体管

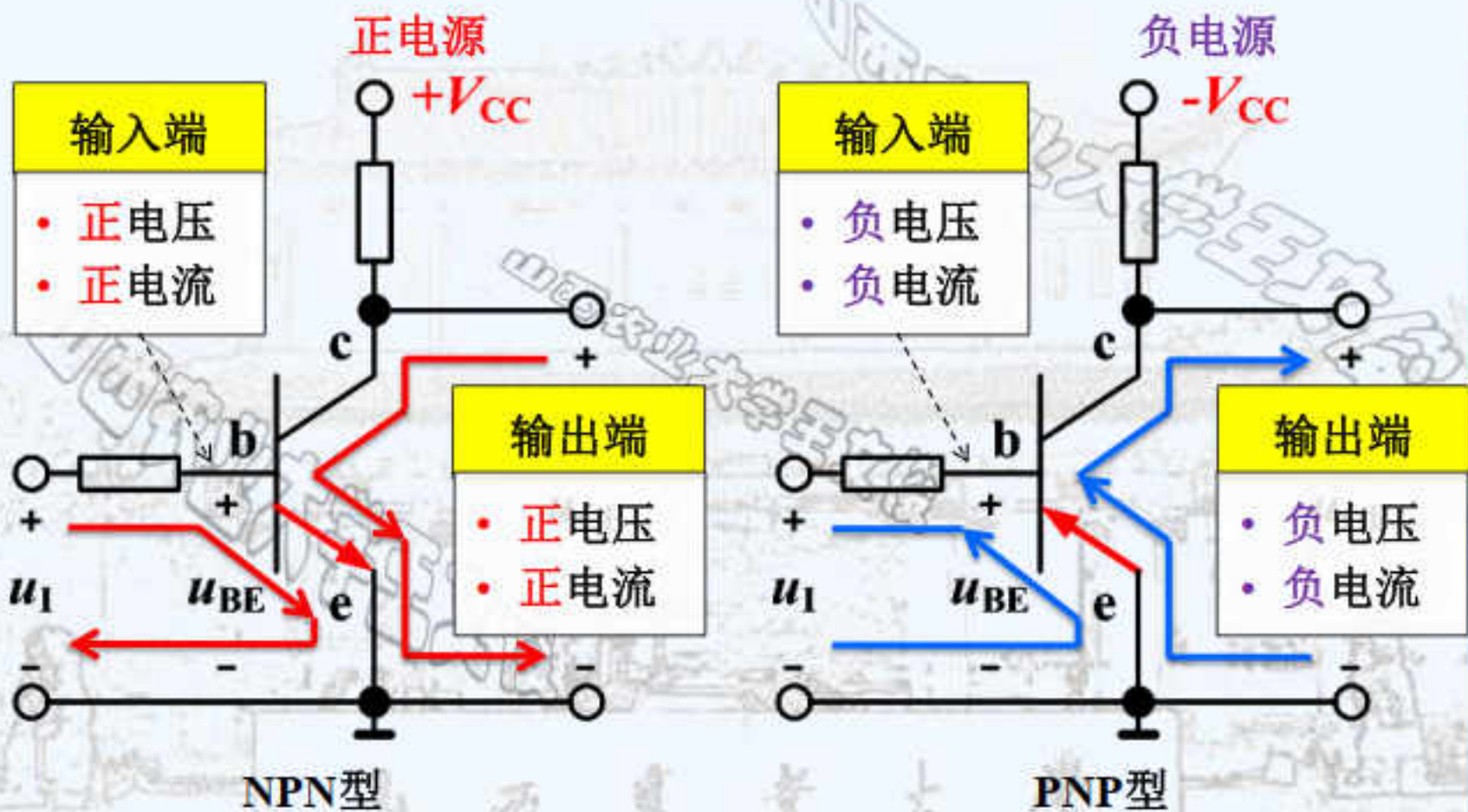
• 1、结构与符号

根据结构的不同，可以将晶体管分为NPN型、PNP型两类。



• 2、基本共射放大电路

由于晶体管结构相反，共射放大电路的电源、电流、电压也相反。

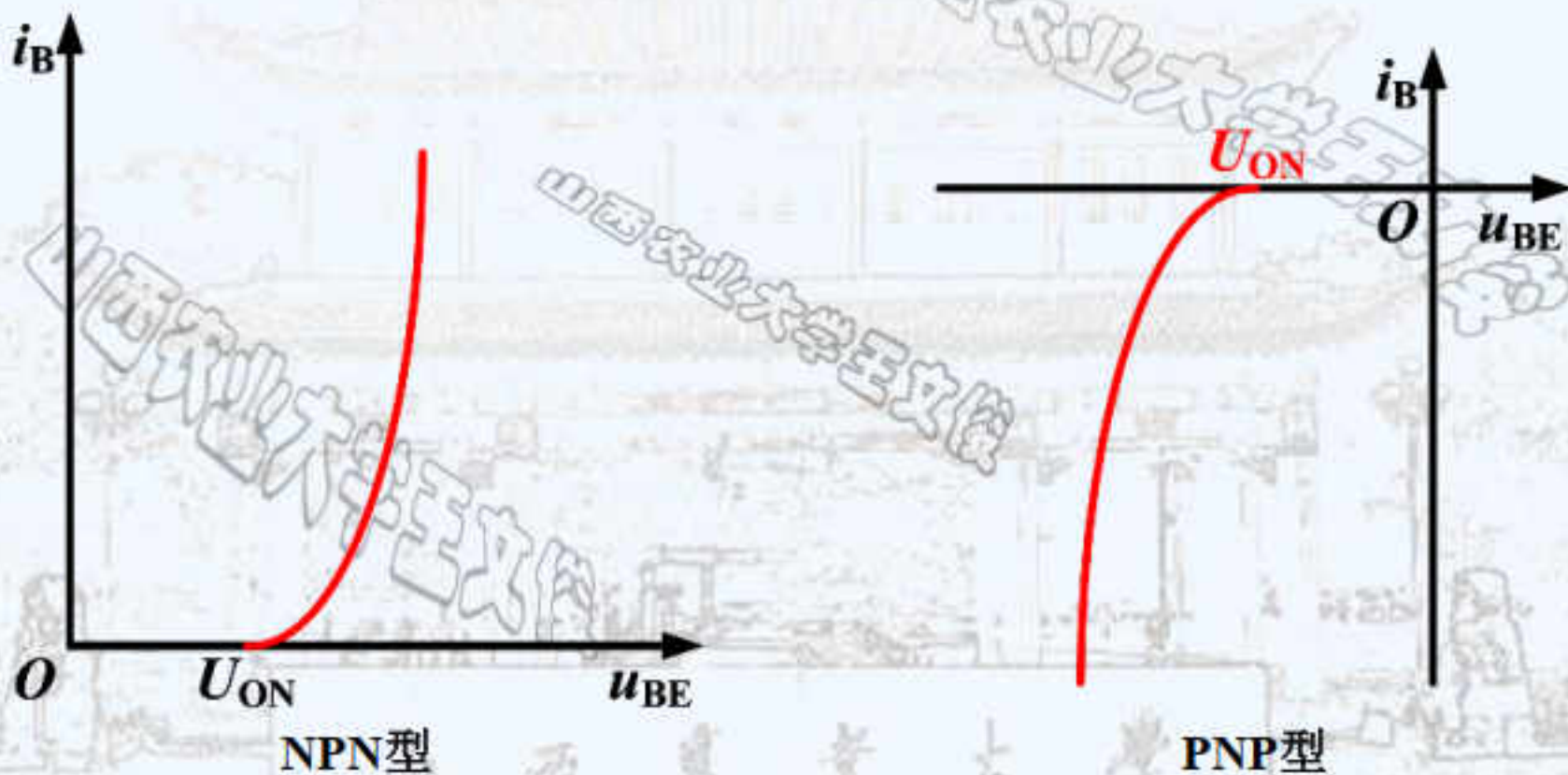


• 3、输入特性曲线

NPN型
输入特性曲线

电流、电压同时取反

PNP型
输入特性曲线

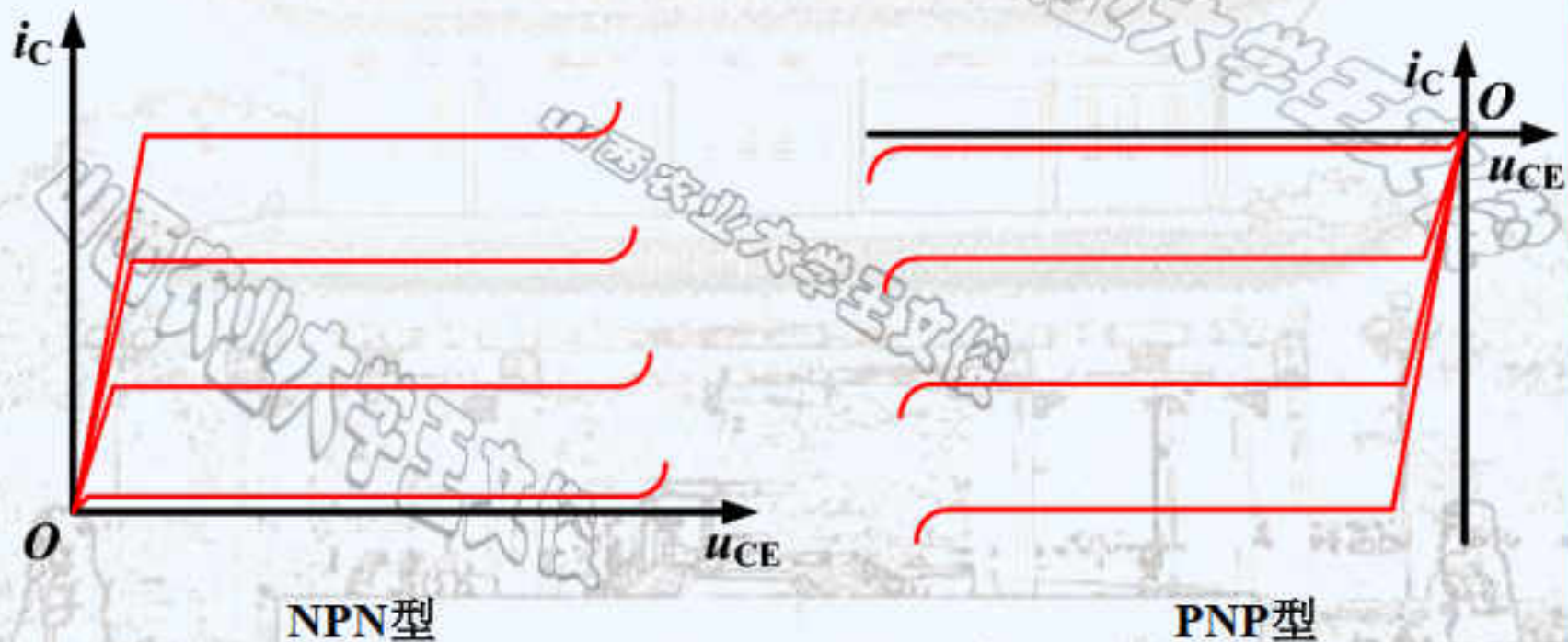


• 4、输出特性曲线

NPN型
输出特性曲线

电流、电压同时取反

PNP型
输出特性曲线



• 5、工作状态

管子类型	开启电压 U_{ON}	截止区	放大区	饱和区
		发射结截止 集电结反偏	发射结正偏 集电结反偏	发射结正偏 集电结正偏
NPN型	$U_{ON} > 0$	$u_{BE} < U_{ON}$ 且 $u_{CE} \geq u_{BE}$	$u_{BE} > U_{ON}$ 且 $u_{CE} \geq u_{BE}$	$u_{BE} > U_{ON}$ 且 $u_{CE} < u_{BE}$
PNP型	$U_{ON} < 0$	$u_{BE} > U_{ON}$ 且 $u_{CE} \leq u_{BE}$	$u_{BE} < U_{ON}$ 且 $u_{CE} \leq u_{BE}$	$u_{BE} < U_{ON}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$