

## 2 半导体三极管及放大电路基础

### 2.1 晶体管

### 2.2 共射极放大电路的组成和工作原理

### 2.3 放大电路的静态分析

### 2.4 放大电路的动态分析

### 2.5 静态工作点的选择和稳定

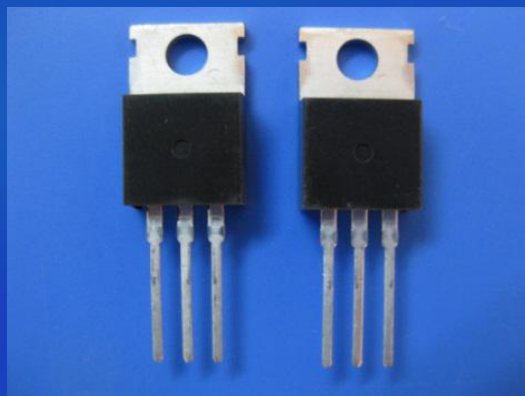
### 2.6 共集电极和共基极放大电路

### 2.7 多级放大电路

## 2 半导体三极管及放大电路基础

### 2.1 半导体三极管

半导体三极管又称简称晶体管。



半导体三极管的**放大作用**和**开关作用**，促使了电子技术的飞跃发展。

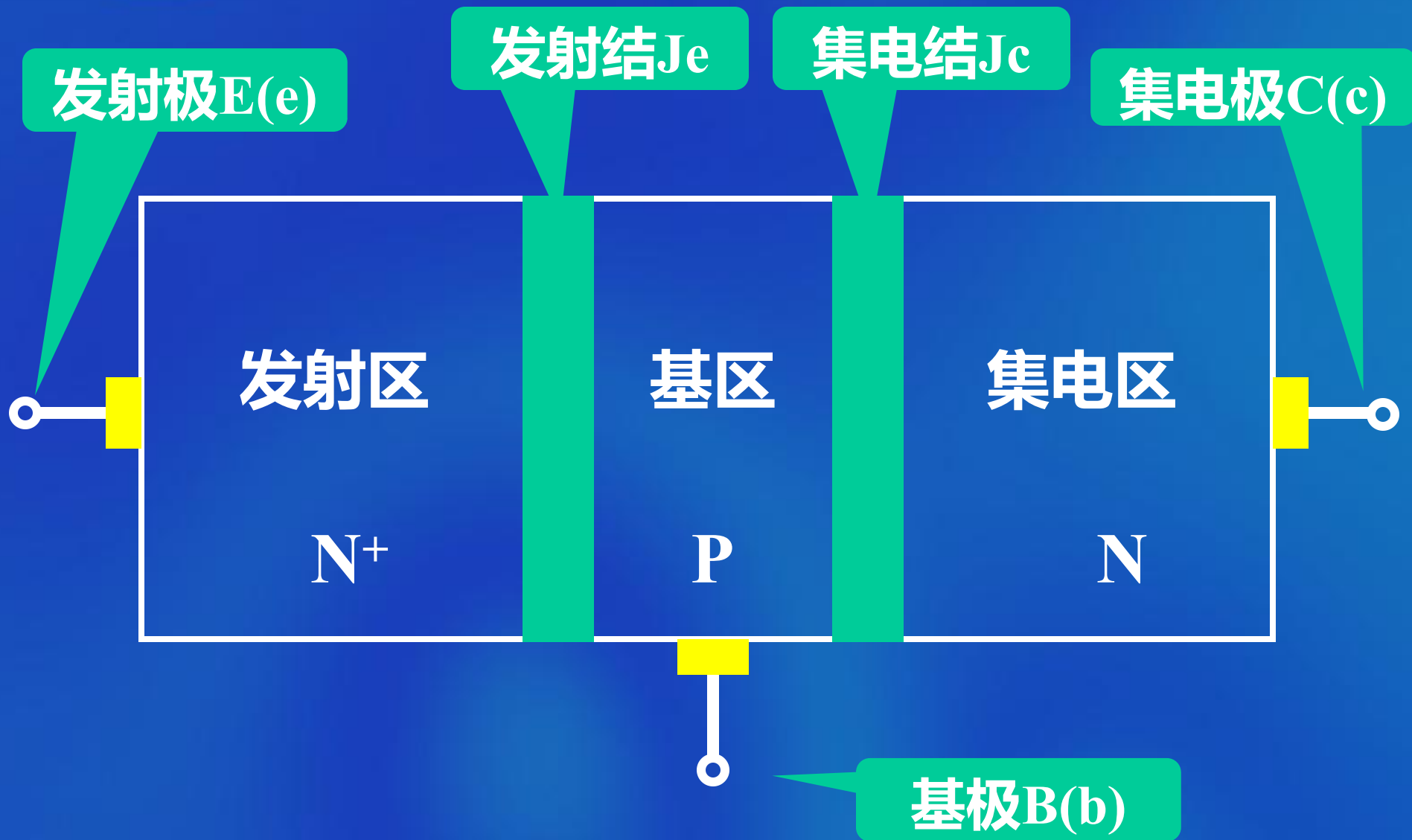
## 2.1.1 半导体三极管的结构

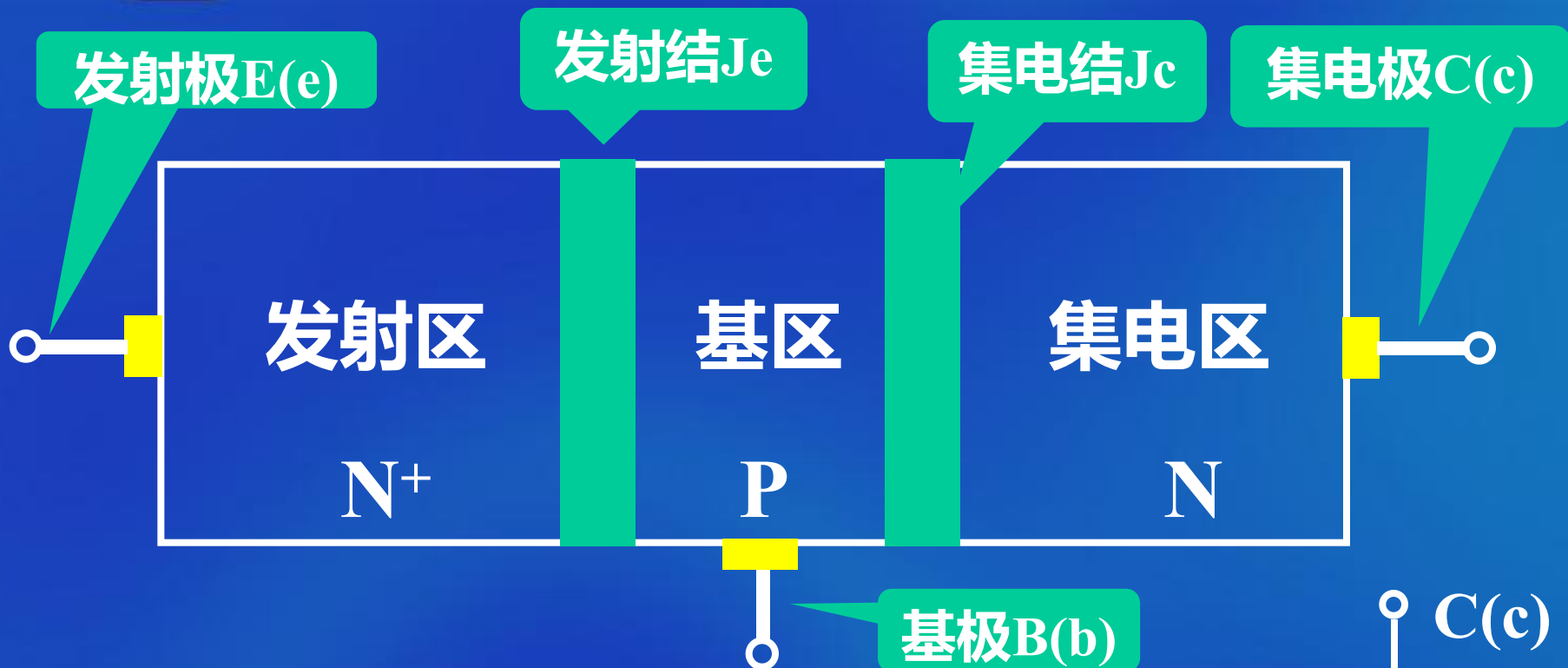
### 三极管的主要类型

(1) 根据结构分: NPN型和PNP型

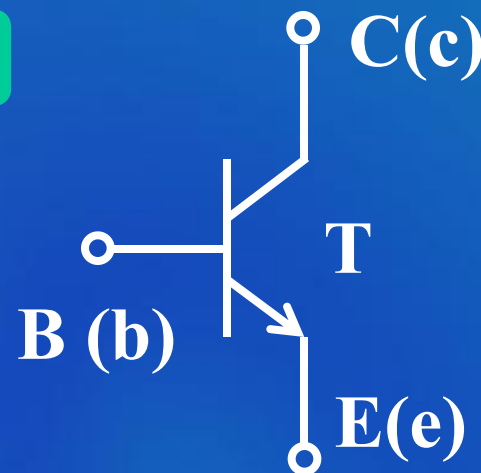
(2) 根据使用的半导体材料分: 硅管和锗管

#### 1. NPN型三极管结构示意图和符号

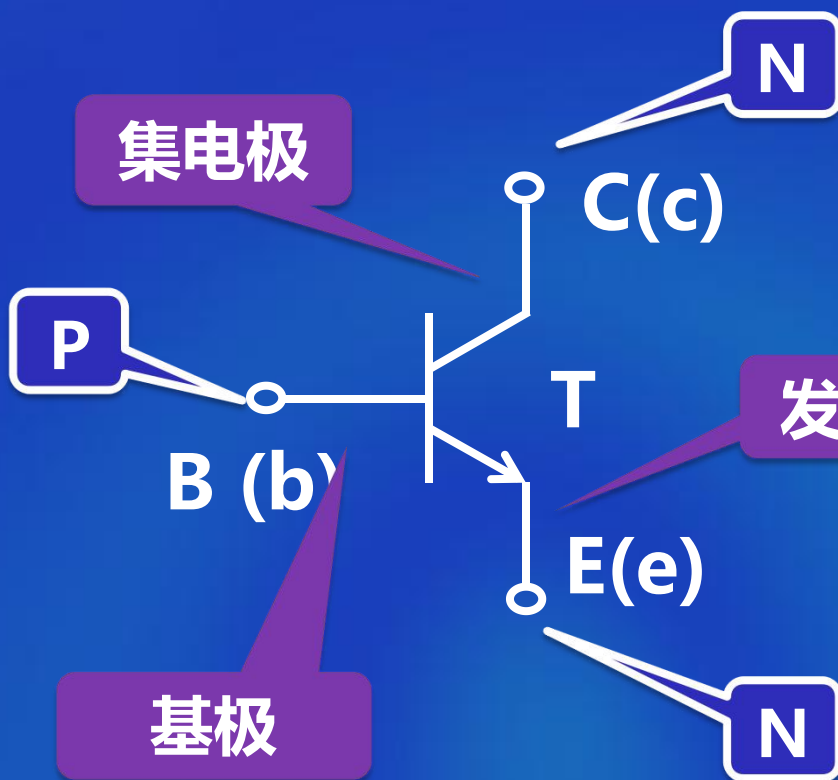




NPN型三极管符号

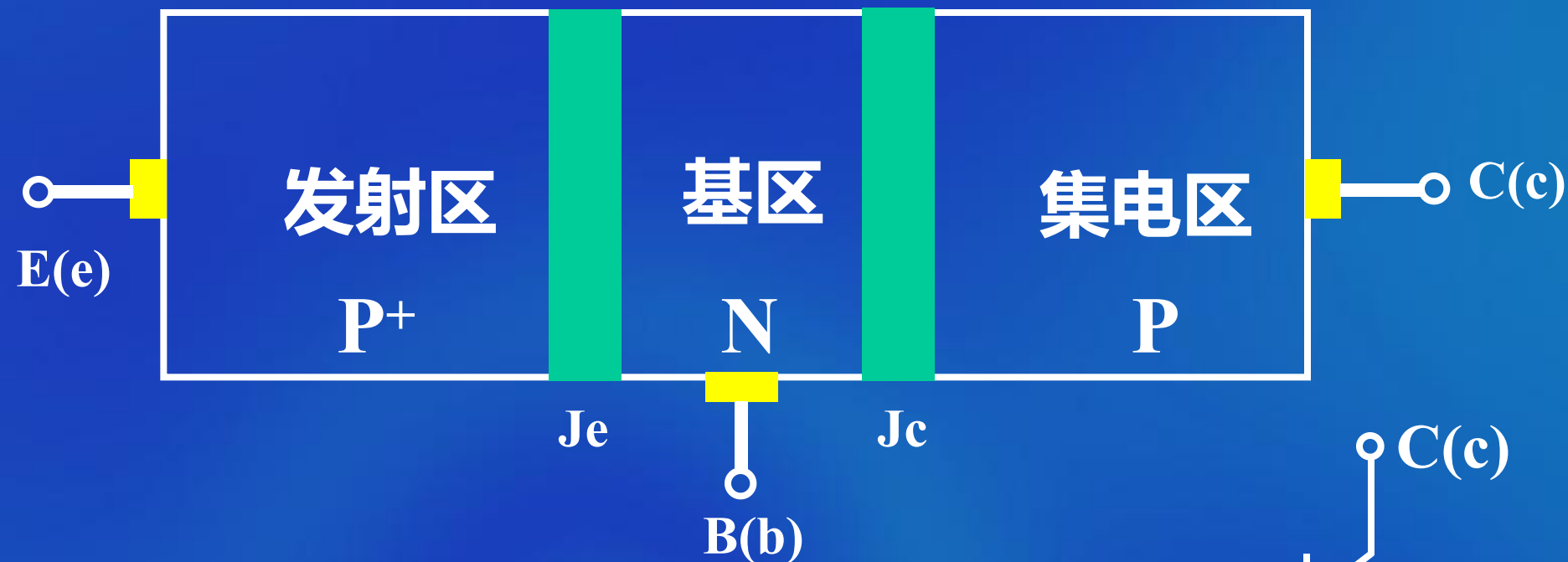


## NPN型三极管符号

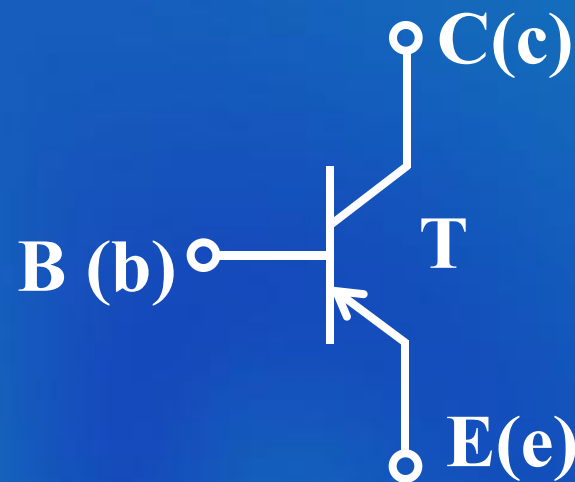


箭头的方向代表晶体管  
放大时射极电流的方向

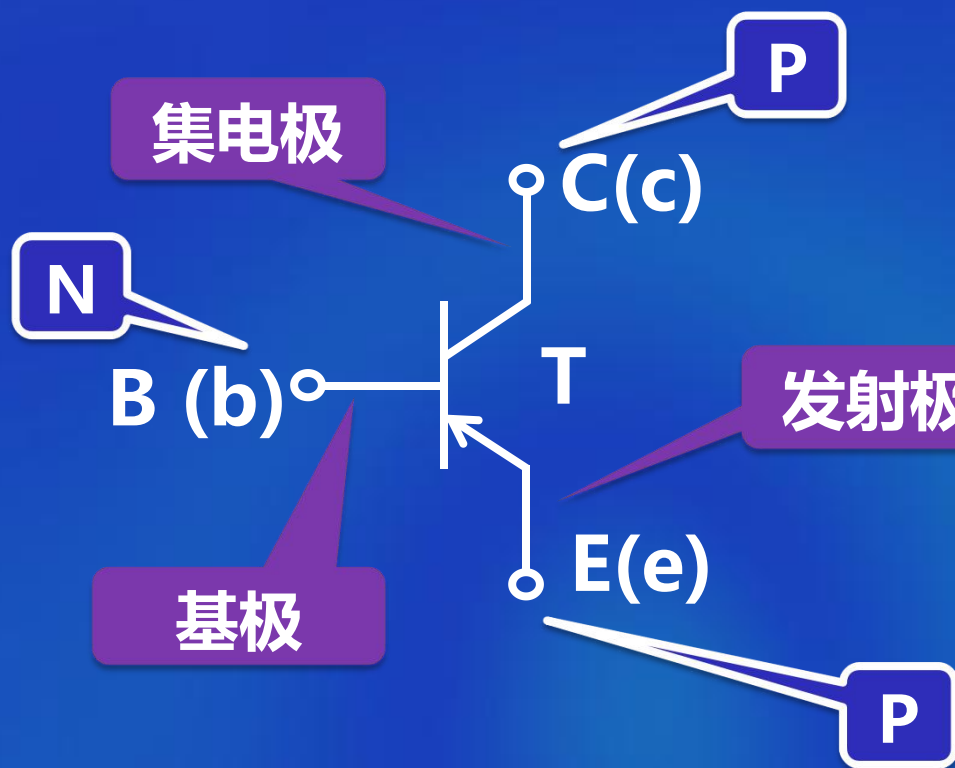
## 2、PNP型三极管结构示意图和符号



PNP型三极管符号

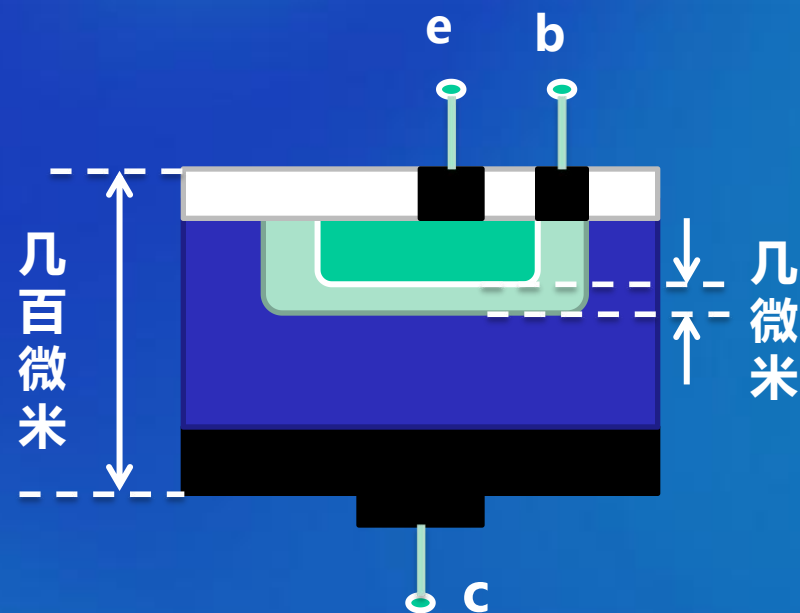
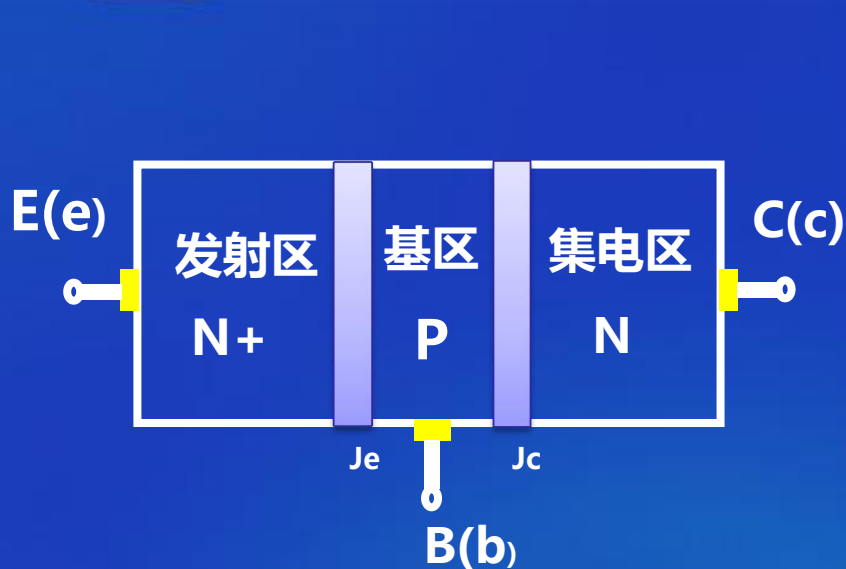


## PNP型三极管符号



箭头的方向代表  
晶体管**放大**时射  
极**电流**的方向





### 3、三极管的内部结构特点（具有放大作用的内部条件）：

- (1) 发射区**小**，掺杂浓度**大**。
- (2) 集电区掺杂浓度**低**，集电区面积**大**。
- (3) 基区掺杂浓度**很低**，且**很薄**。

## 2.1.2 三极管工作原理（以NPN型管为例）

依据两个PN结的偏置情况

晶体管的工作状态

放大状态

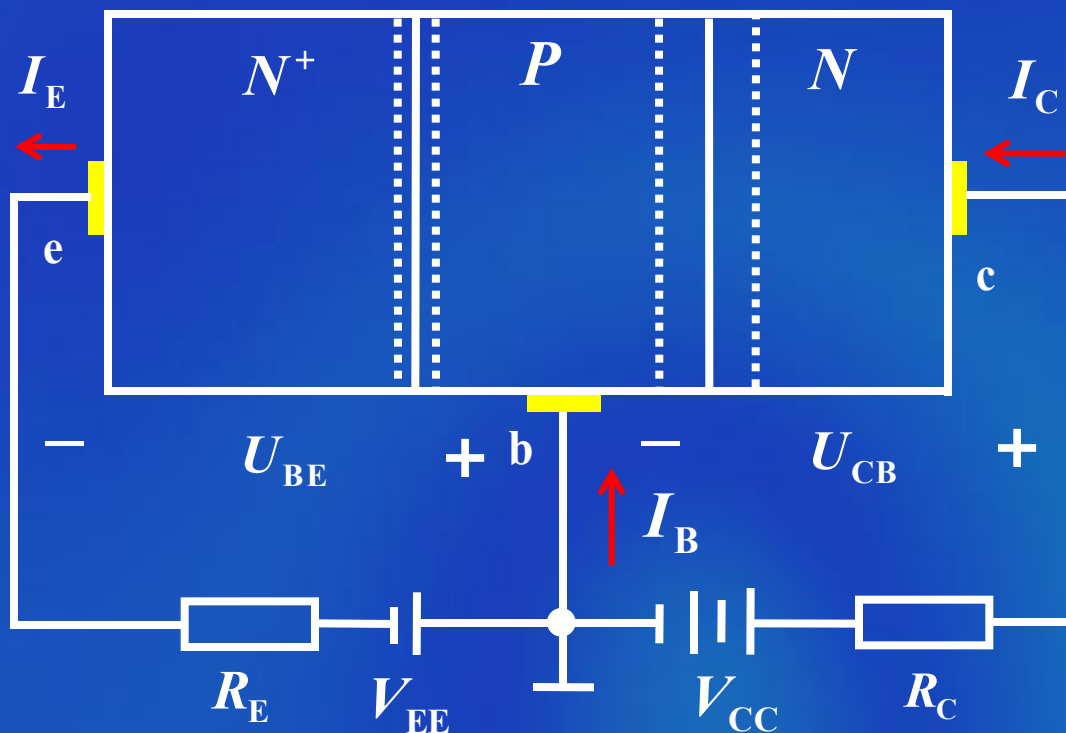
饱和状态

截止状态

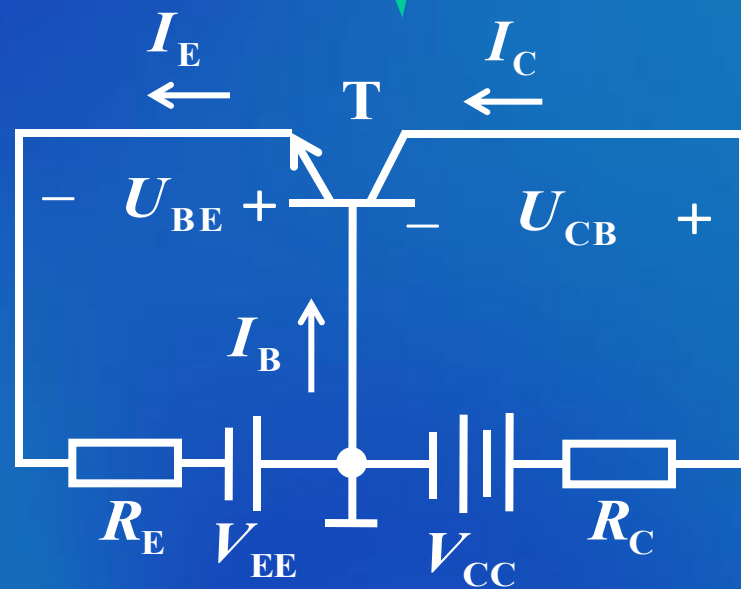
倒置状态

# 1. 发射结正向偏置、集电结反向偏置—放大状态

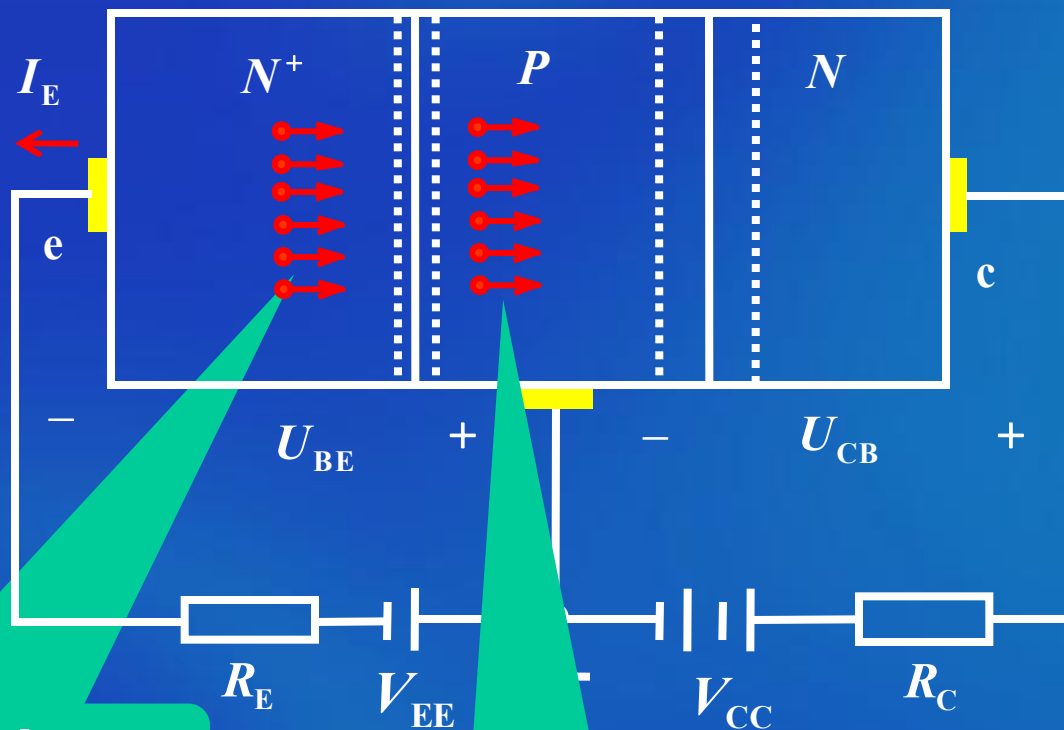
原理图



电路图



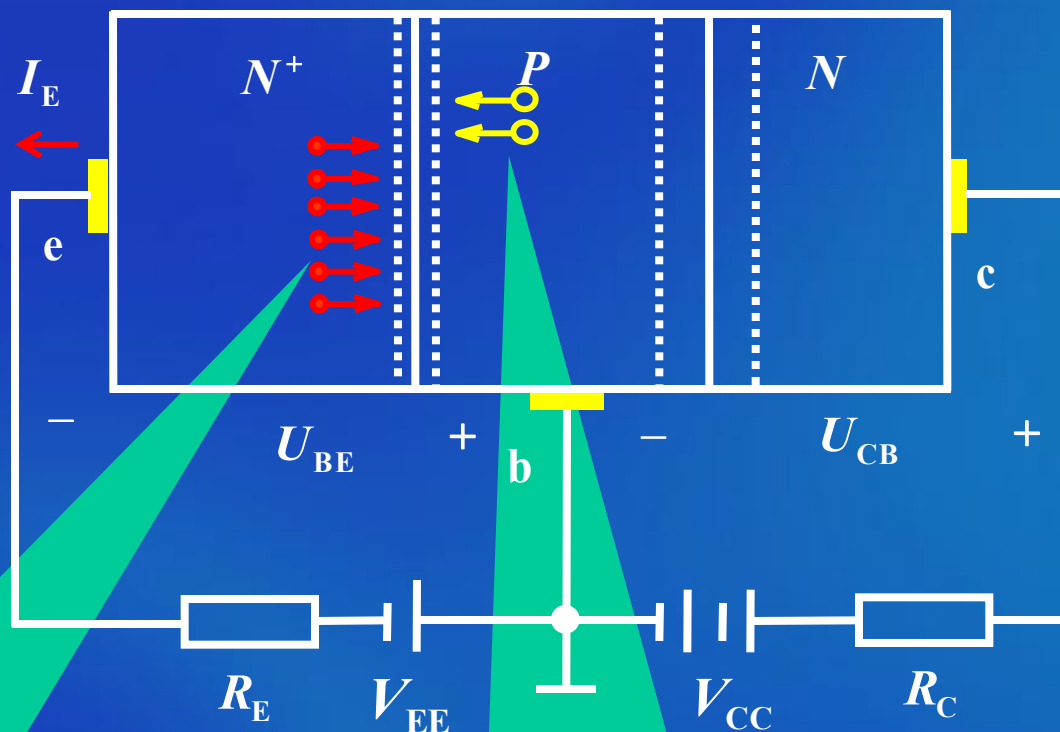
# (1) 电流关系



发射区向基区扩散电子

a. 发射区向基区扩散电子  
形成发射极电流  $I_E$ 。

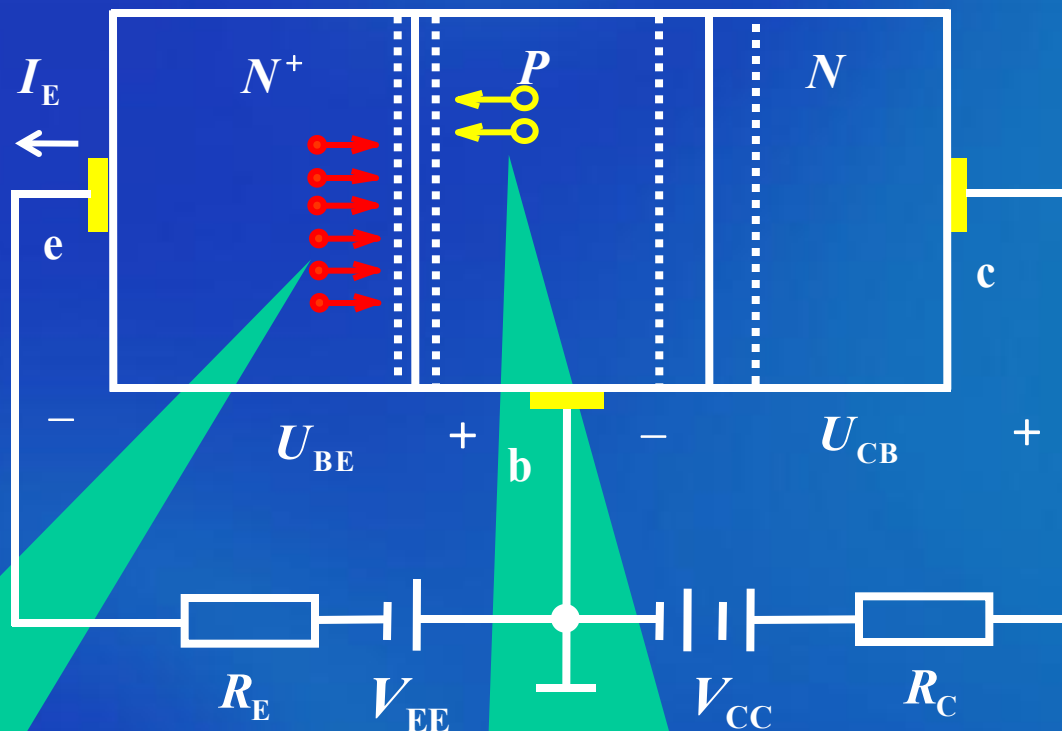
称扩散到基区的发射区多子为非平衡少子



发射区向基区扩散电子

基区向发射区扩散空穴

基区向发射区扩散空穴  
形成空穴电流。

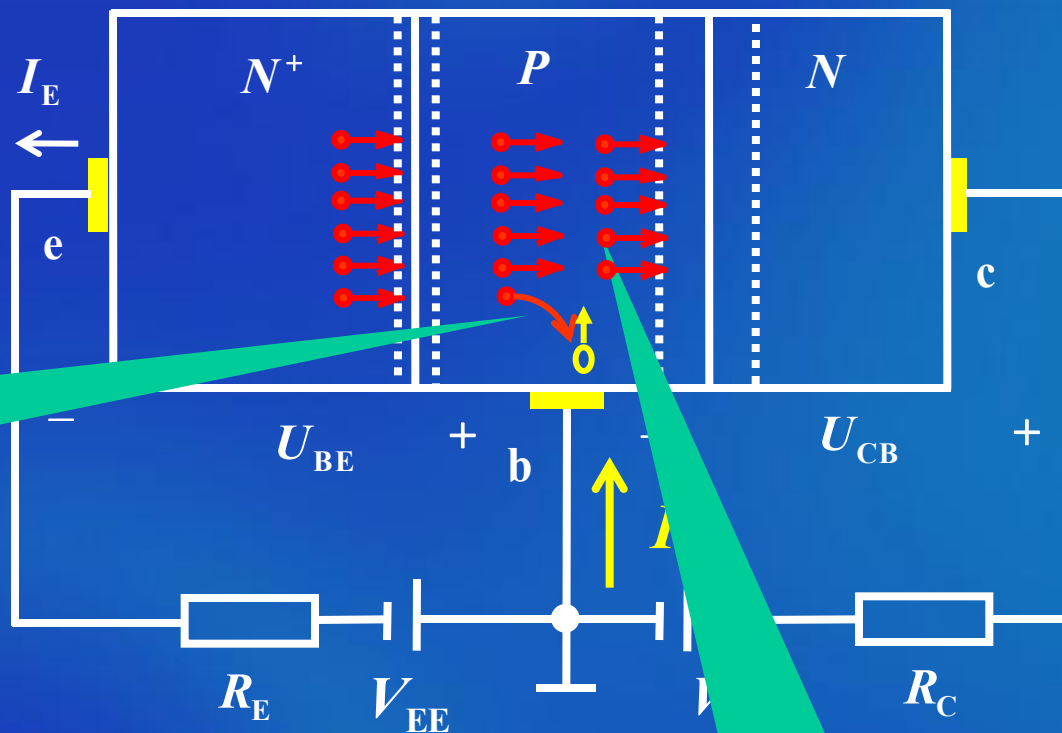


发射区向基区扩散电子

基区向发射区扩散空穴

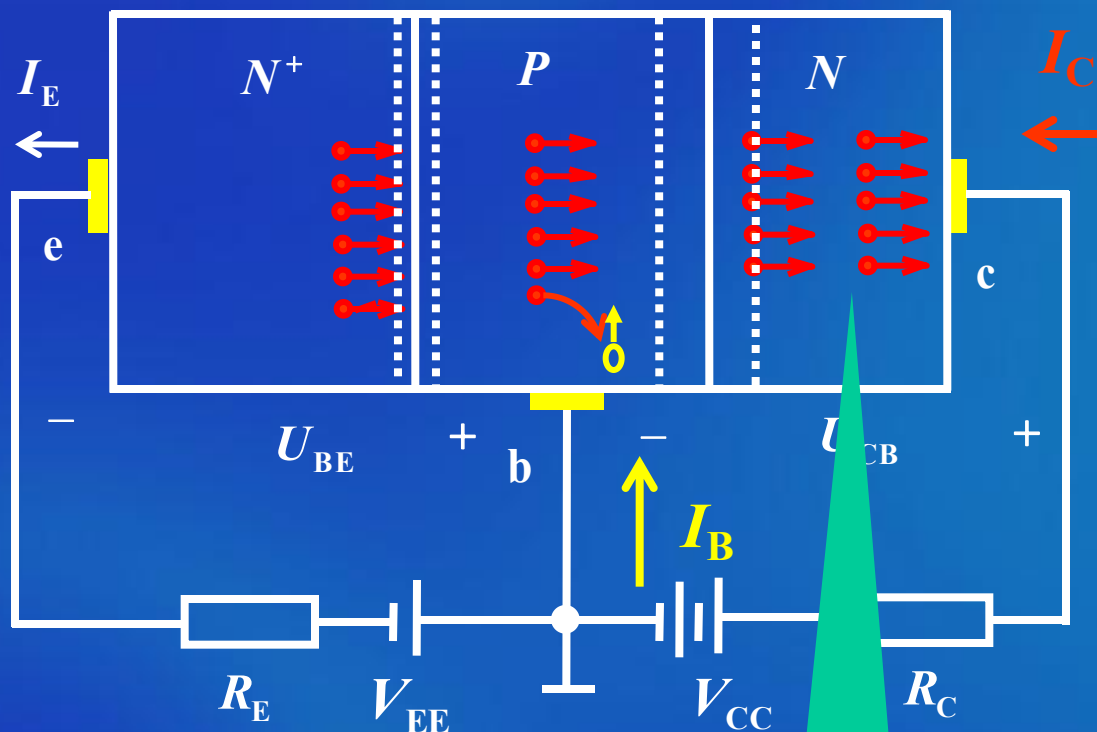
因为发射区的掺杂浓度远大于基区浓度，  
空穴电流忽略不计。

非平衡少子在基区复合，形成基极电流  $I_B$



非平衡少子向集电结扩散

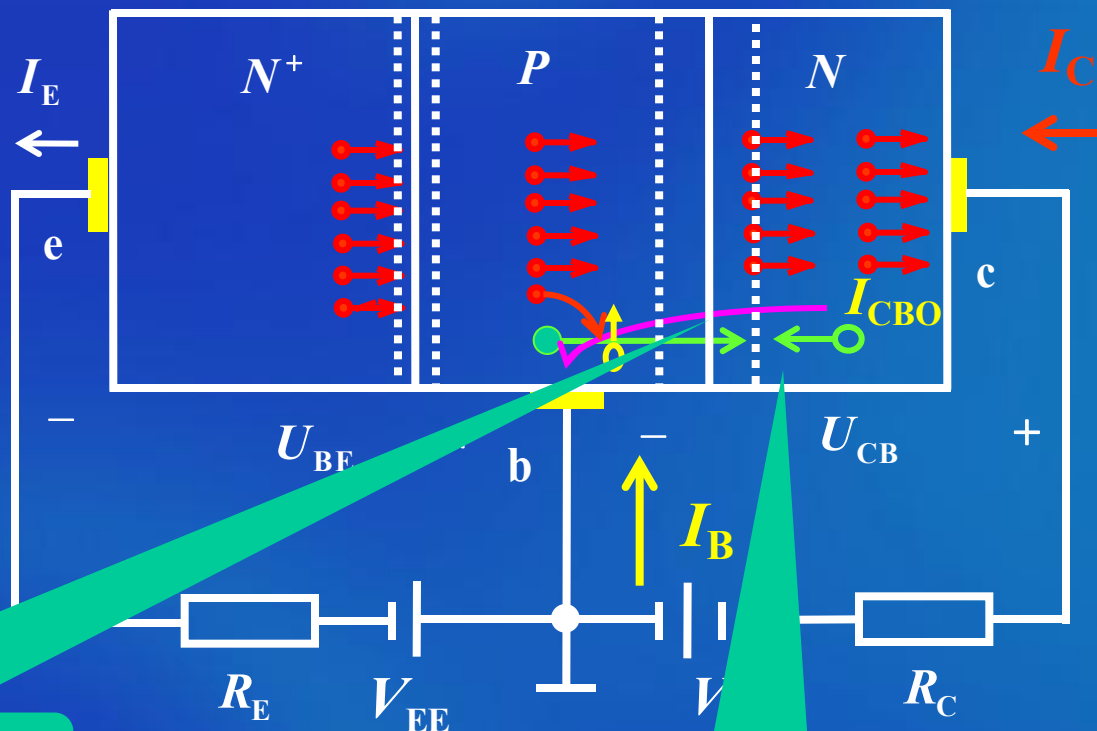
b. 基区电子扩散和复合



非平衡少子  
到达集电区

C. 集电区收集从发射区扩散过来的电子  
形成集电极电流  $I_C$



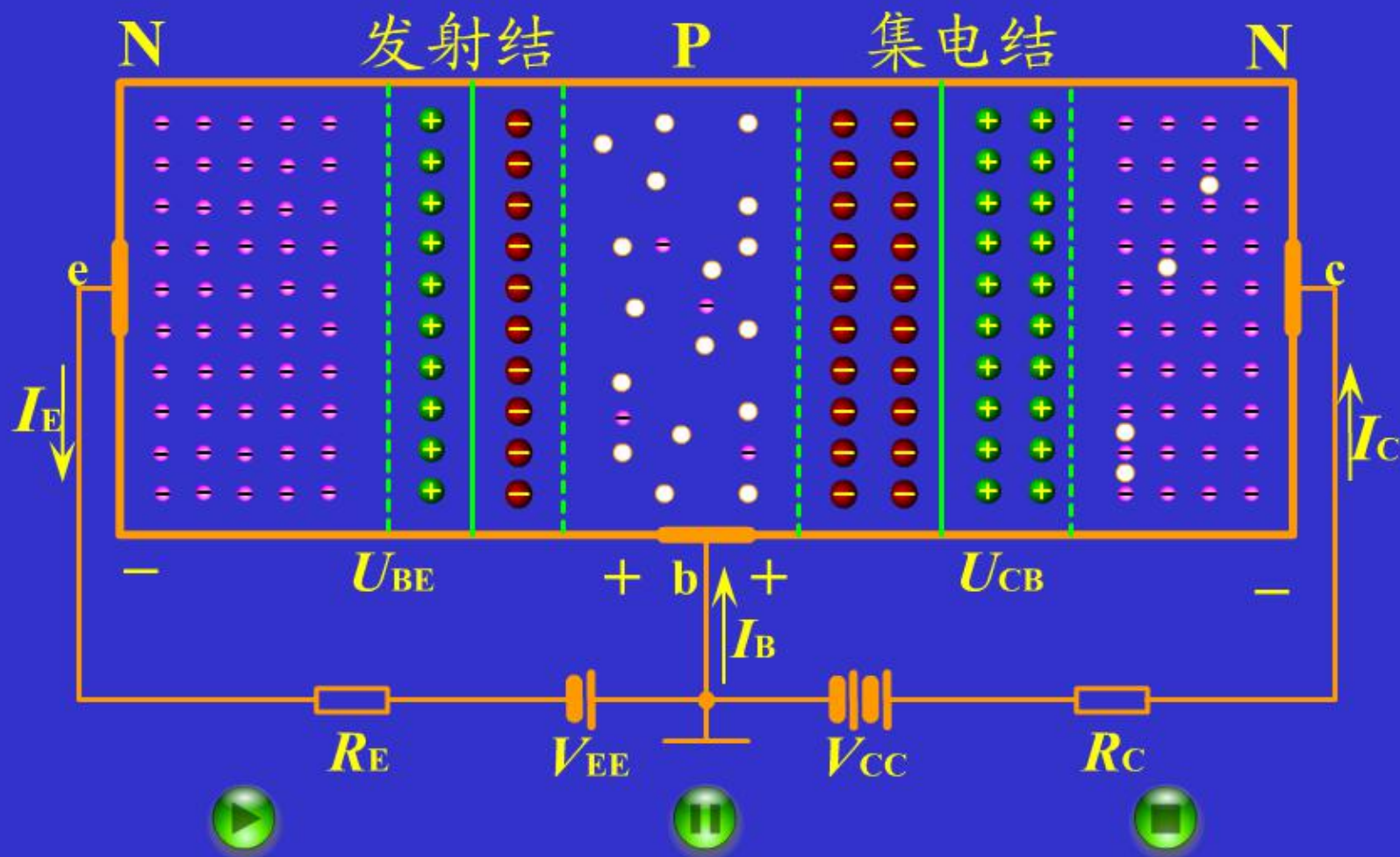


形成反向饱和电流  $I_{CBO}$

少子相互漂移

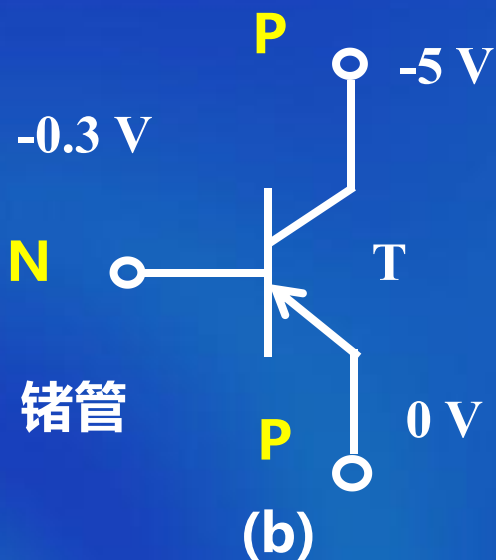
集电区、基区少子相互漂移

# 三极管的电流分配关系动画演示

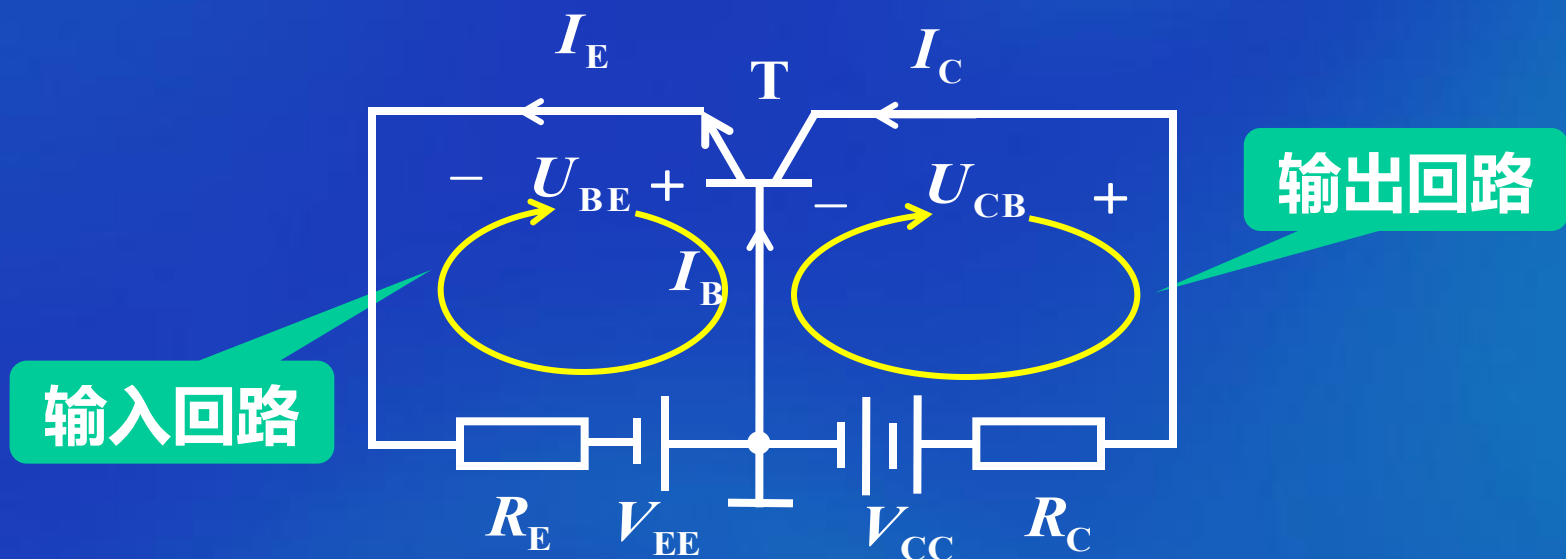


## 晶体管各电极电位：

**放大**



**放大状态**--发射结正向偏置、集电结反向偏置



发射结回路为输入回路，集电结回路为输出回路。

基极是两个回路的公共端，称三极管这种接法为**共基极接法**。

定义

$$\bar{\alpha} = \left. \frac{I_C}{I_E} \right|_{I_{CBO}=0}$$

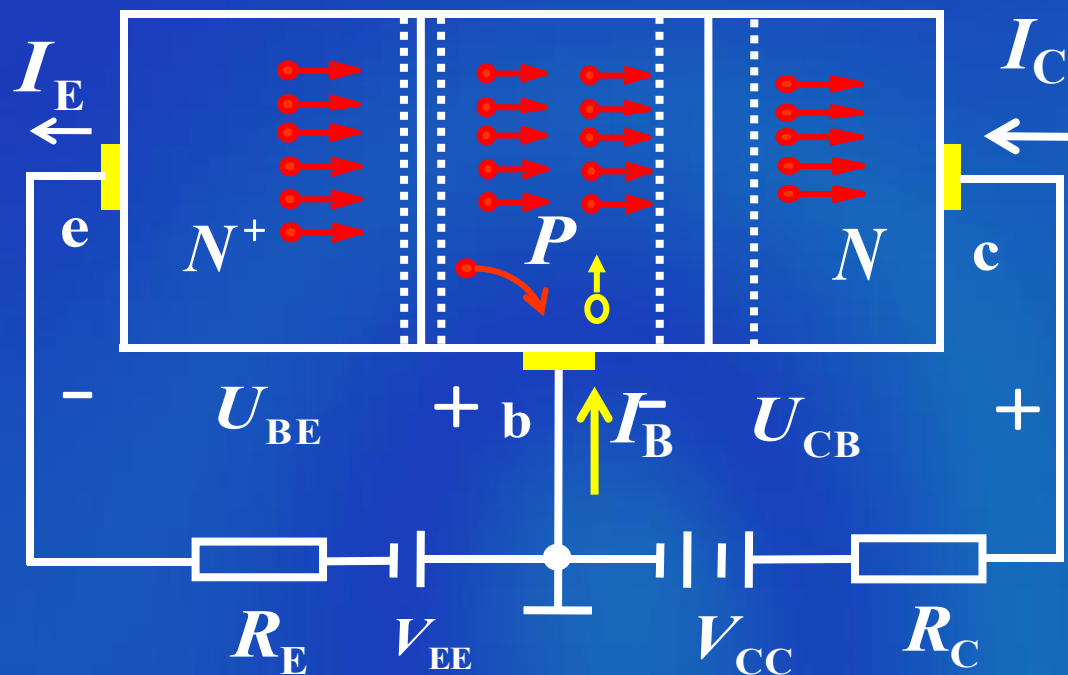
$\bar{\alpha}$  称为共基极直流电流放大系数

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \bigg|_{I_{CBO}=0}$$

$\bar{\alpha}$  称为共基极**直流电流放大系数**

0.99 可以理解为**晶体管的电流分配关系**

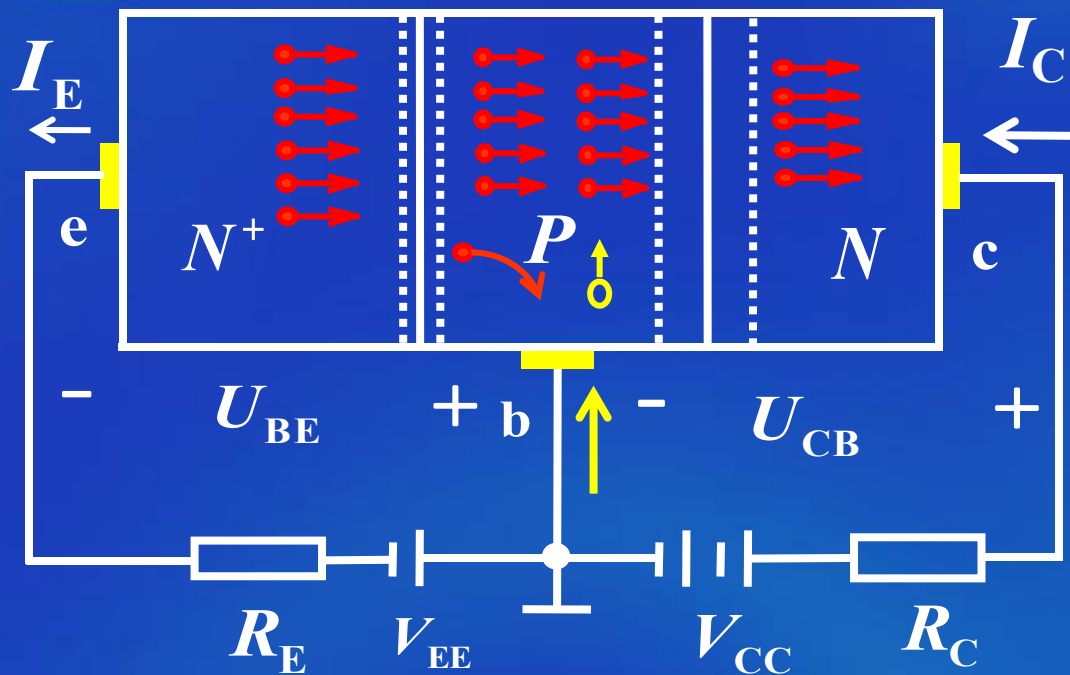
发射100个电子，扩散了99个，复合1个



**晶体管的电流分配关系具有恒定性**

$$I_E \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$$

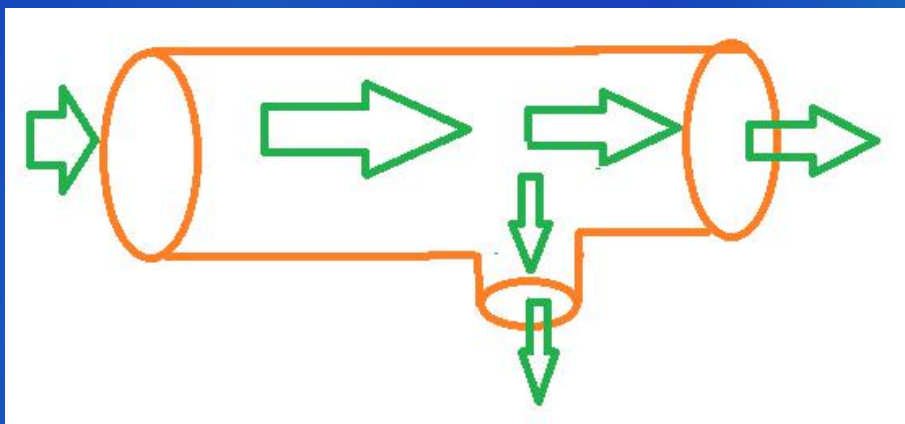
$$I_E \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$



晶体管的电流分配关系具有恒定性

$$I_E \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow$$

$$I_E \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow$$

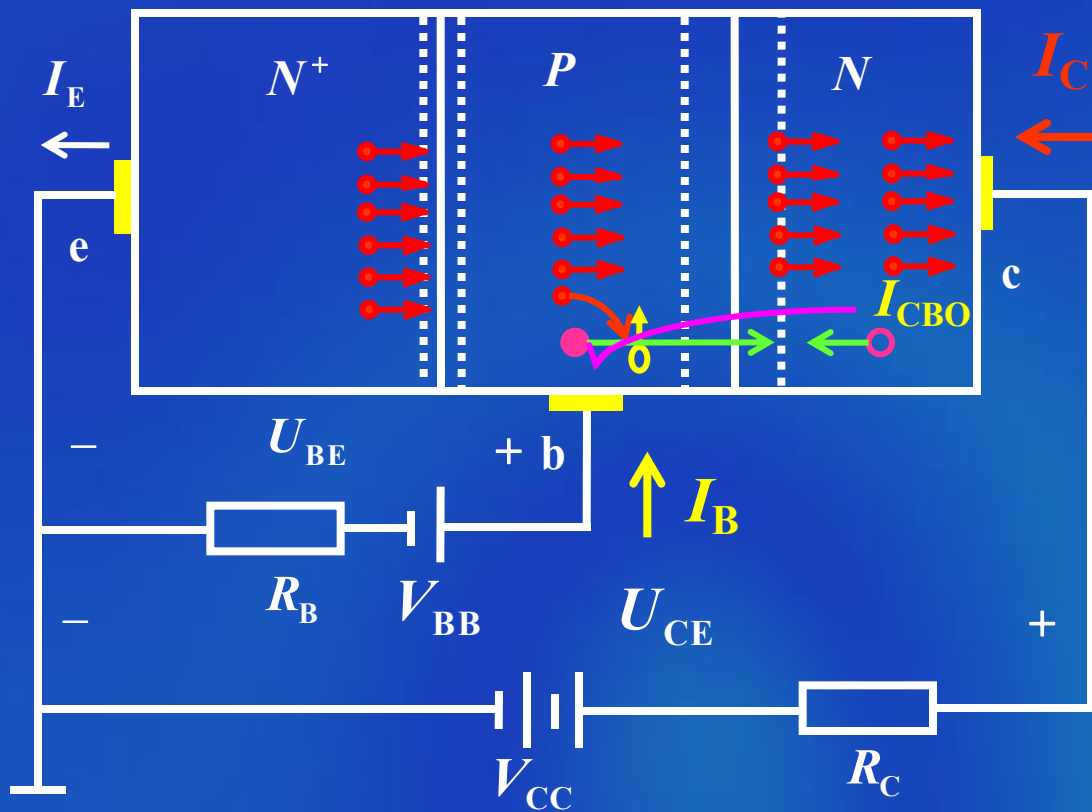


忽略饱和电流  $I_{CBO}$

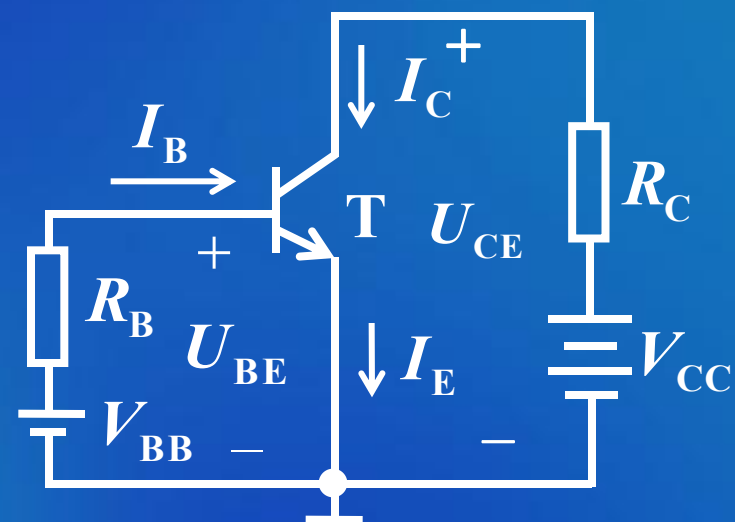
$$I_E = I_C + I_B$$

# 晶体管共射极接法

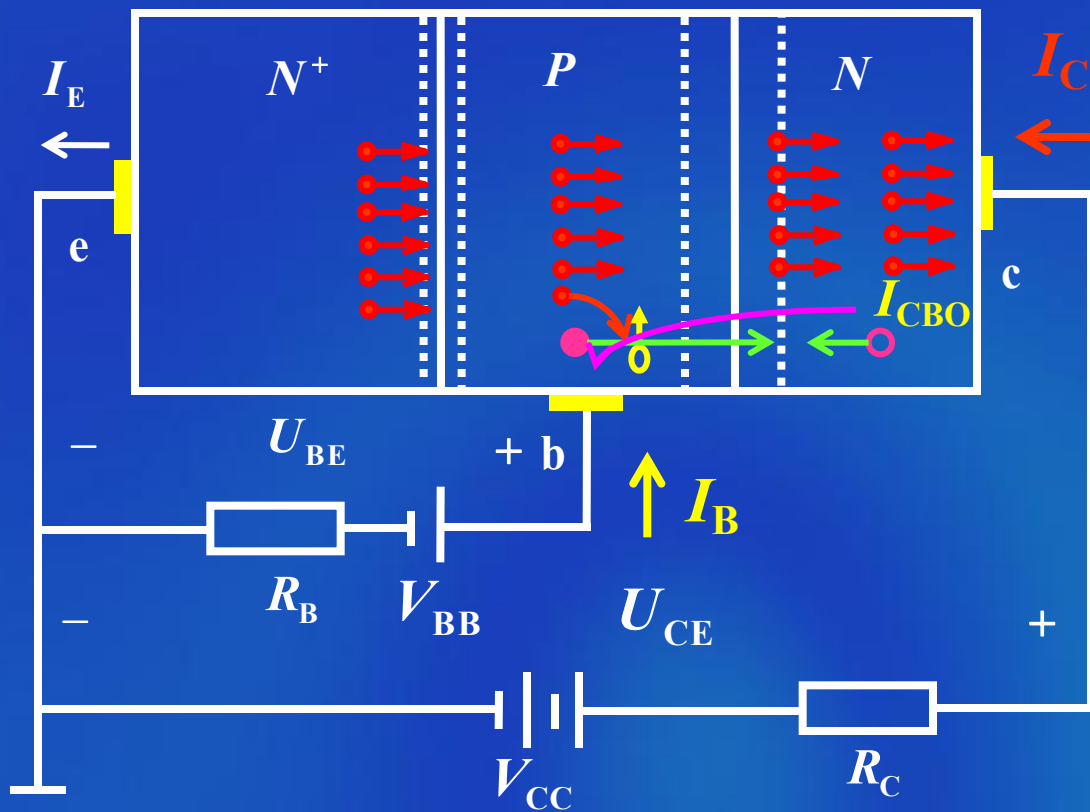
原理图



电路图







## 定义

$$\overline{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{I_{CBO}=0}$$

## 为三极管共射极直流电流放大系数



## $\bar{\alpha}$ 由 $\bar{\beta}$ 的关系式

由 
$$I_E = I_C + I_B$$

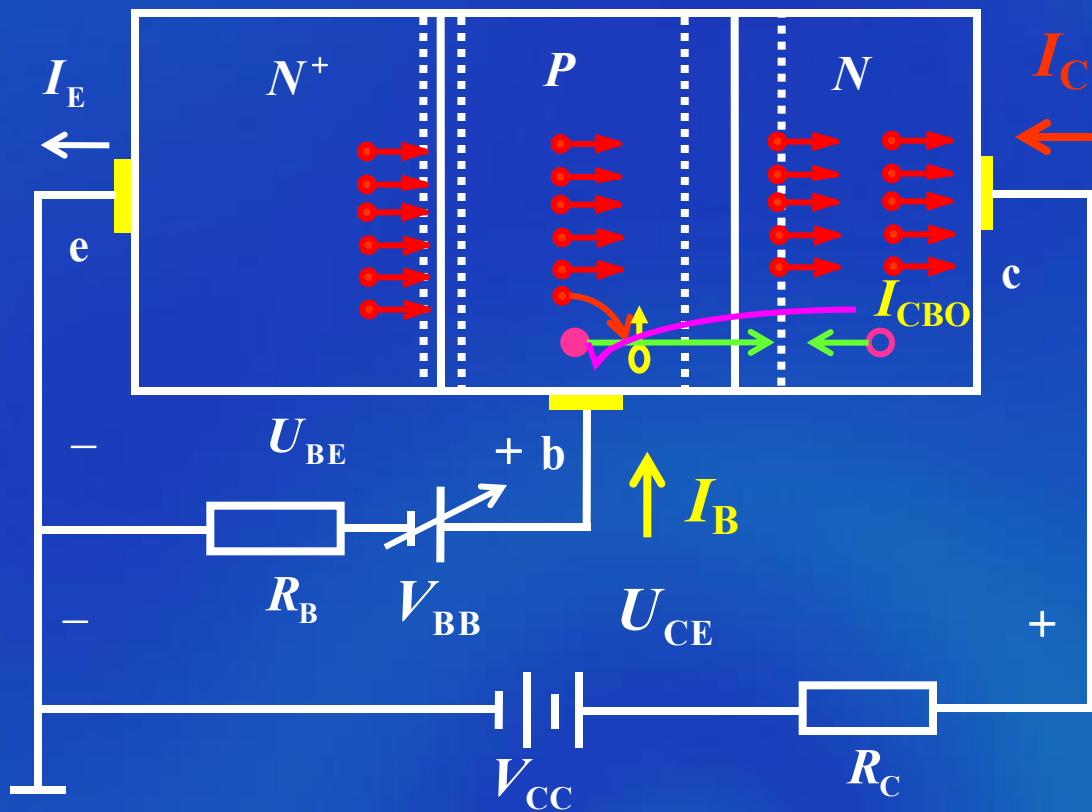
## 及 $\bar{\alpha}$ 与 $\bar{\beta}$ 的定义

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

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

$$\bar{\alpha} = 0.95 \sim 0.995$$

$$\bar{\beta} = 20 \sim 200$$



当输入回路电压

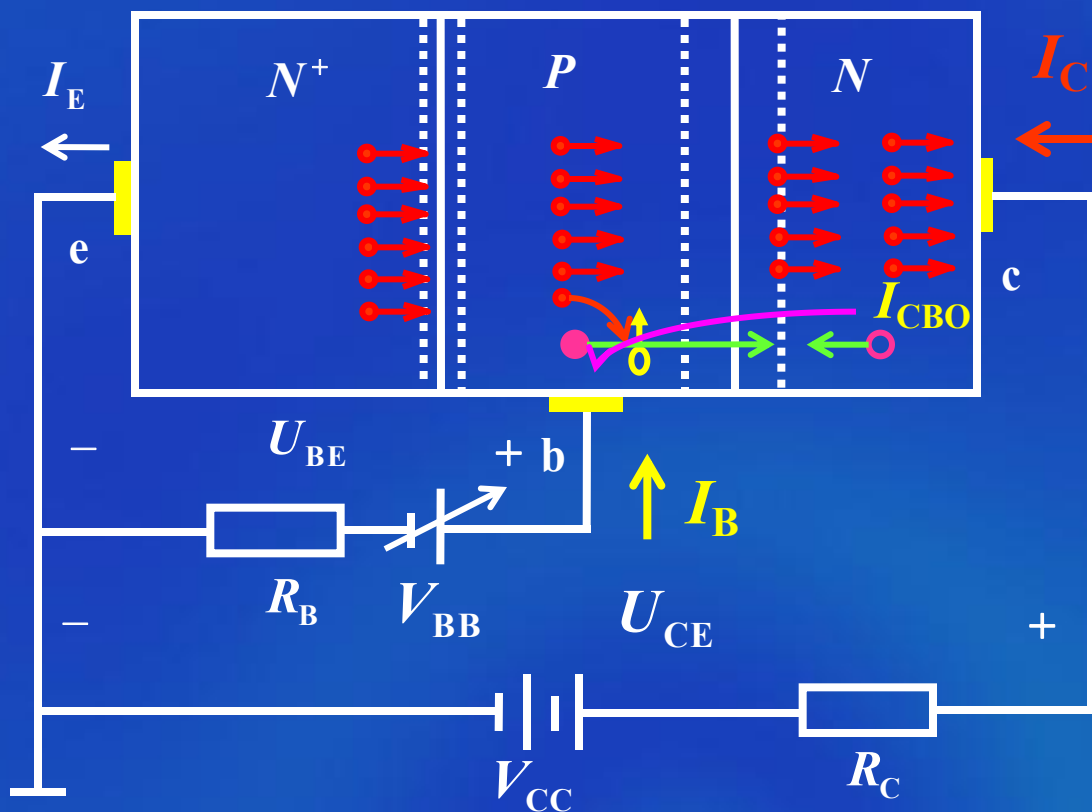
$$U'_{BE} = U_{BE} + \Delta U_{BE}$$

那么

$$I'_B = I_B + \Delta I_B$$

$$I'_C = I_C + \Delta I_C$$

$$I'_E = I_E + \Delta I_E$$



当输入回路电压

$$U'_{BE} = U_{BE} + \Delta U_{BE}$$

那么



如果  $\Delta U_{BE} > 0$  , 那么  $\Delta I_B > 0$  ,  $\Delta I_C > 0$  ,  $\Delta I_E > 0$

如果  $\Delta U_{BE} < 0$  , 那么  $\Delta I_B < 0$  ,  $\Delta I_C < 0$  ,  $\Delta I_E < 0$

定义

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

共基极交流电流放大系数

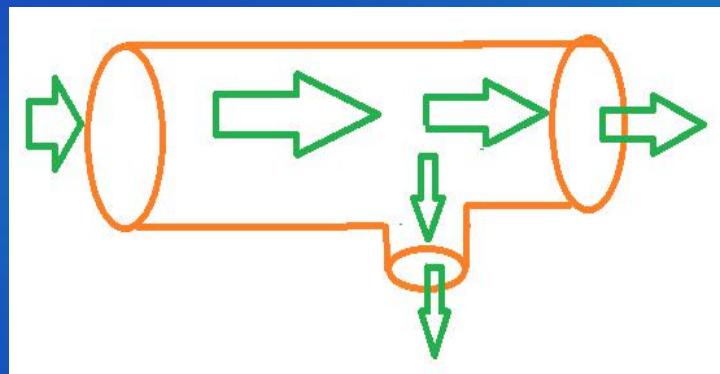
$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

共射极交流电流放大系数

因为 $\alpha$ 与 $\beta$ 关系

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

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



一般可以认为：

$$\bar{\alpha} \approx \alpha, \quad \bar{\beta} \approx \beta$$

# 符号的意义

• 电流：

(一个下标)

$I_B$

$i_b$

$I_b$

$i_B$

• 电压：

(二个下标)

$U_{BE}$

$u_{be}$

$U_{be}$

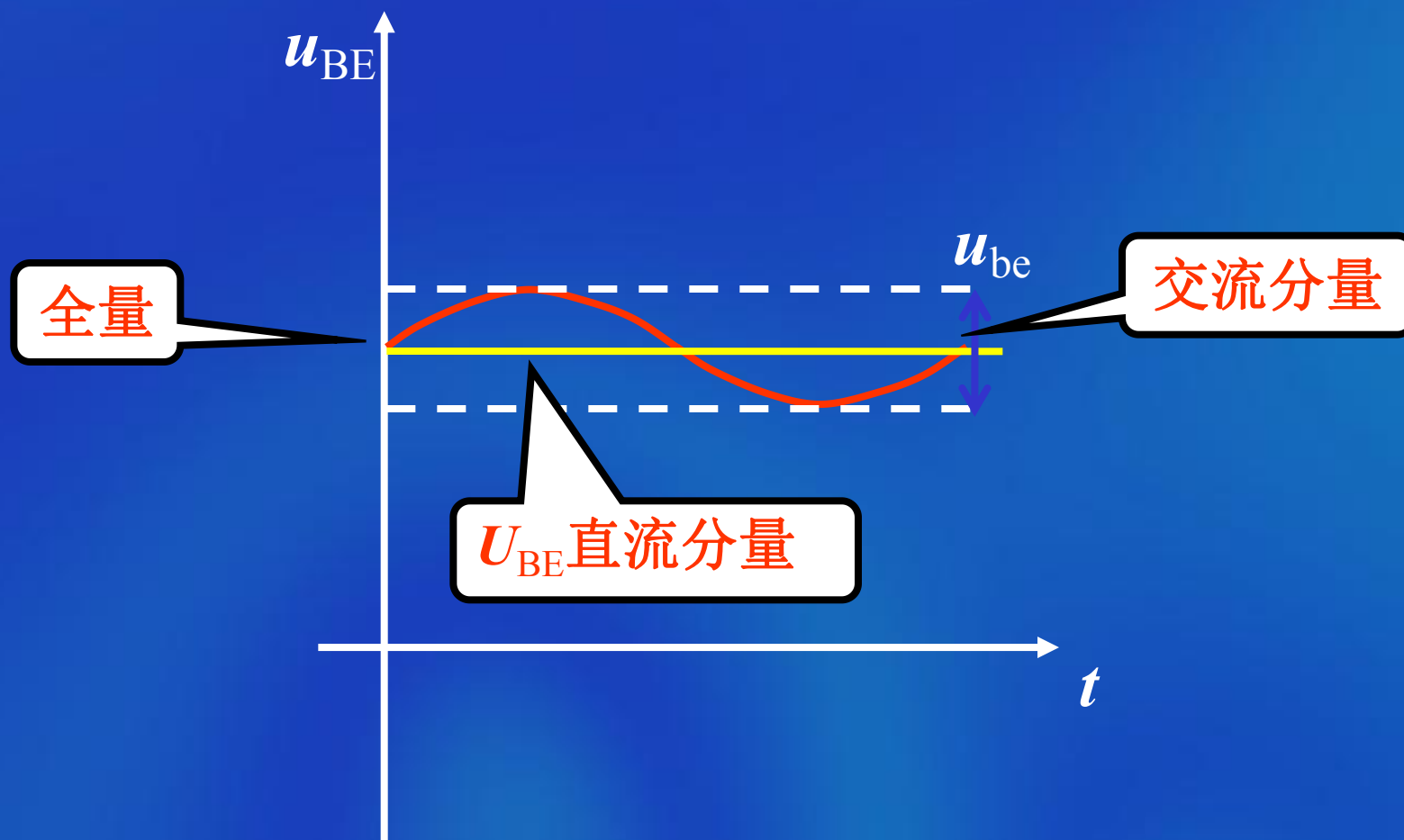
$u_{BE}$

↑  
直流

↑  
交流  
瞬时值

↑  
交流  
有效值

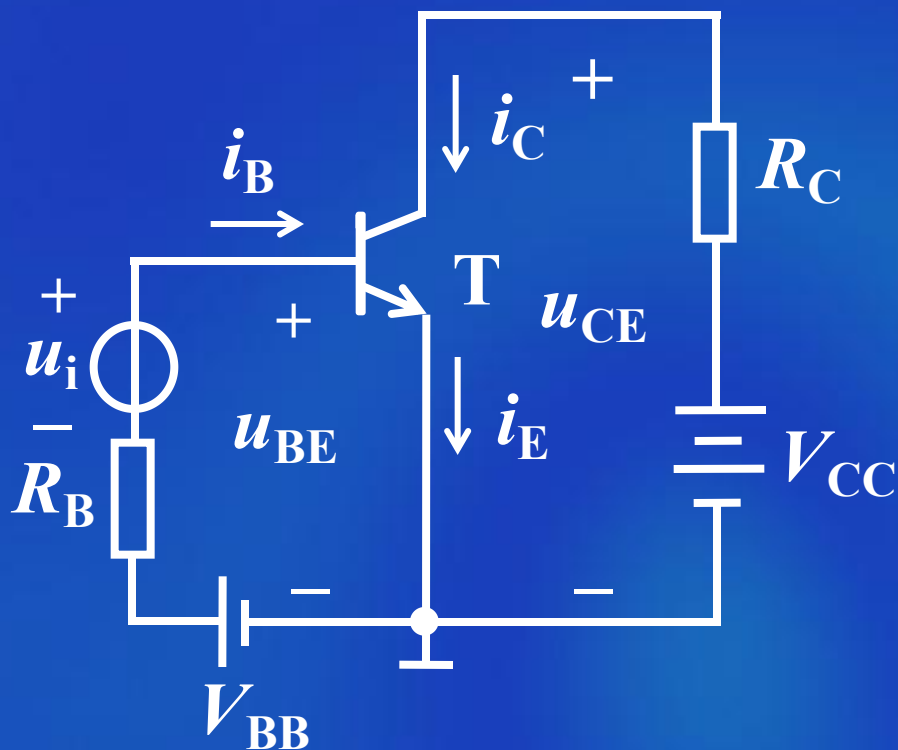
↑  
交流 +  
直流



## (2) 放大原理

设输入信号  $u_i = U_{im} \sin \omega t \text{ V}$

放大电路



那么

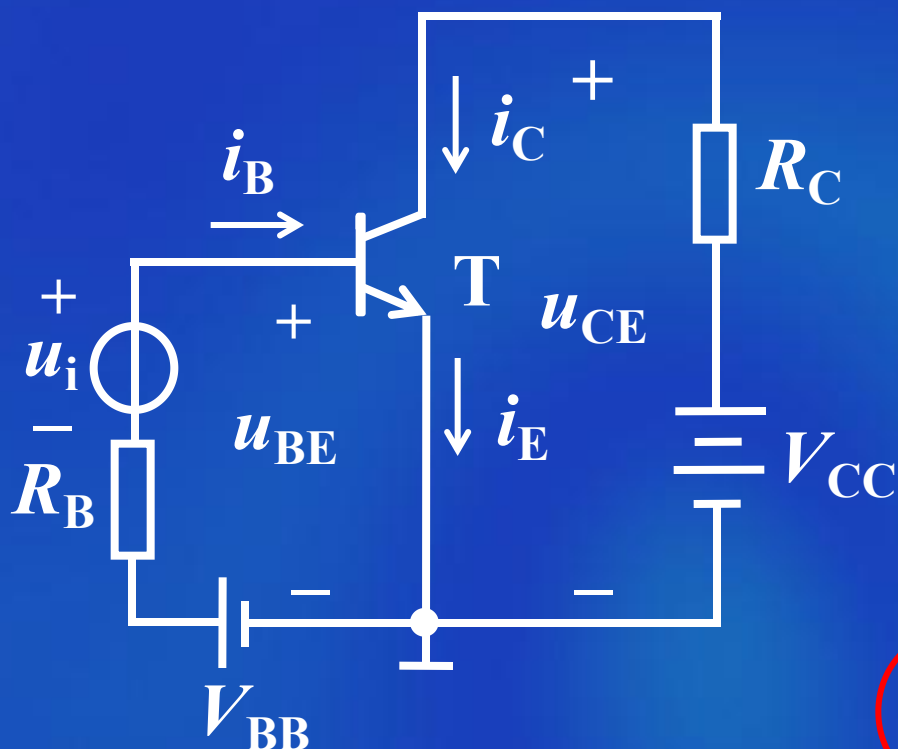
$$u_i = u_{be}$$

$$u_{BE} = u_{be} + U_{BE}$$

$$i_B = i_b + I_B$$

$$i_C = i_c + I_C$$

$$u_{CE} = u_{ce} + U_{CE}$$



$$\begin{aligned} u_{CE} &= V_{CC} - i_C R_c \\ &= V_{CC} - (I_C + i_c) R_c \\ &= (V_{CC} - I_C R_c) - i_c R_c \end{aligned}$$

由  $u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$

$$u_{ce} = -i_c R_c$$

可知

a. 在  $R_C$  两端有一个较大的交流分量可供输出。

b. 交流信号的传递过程

$$u_i \rightarrow i_b \rightarrow i_c \rightarrow i_c R_c \rightarrow u_{ce}$$



- **晶体管放大的条件：**
- **内部条件：**发射区掺杂浓度高，面积小；  
基区掺杂浓度低且很薄；  
集电区掺杂浓度低，面积大。
- **外部条件：**发射结正偏，集电结反偏

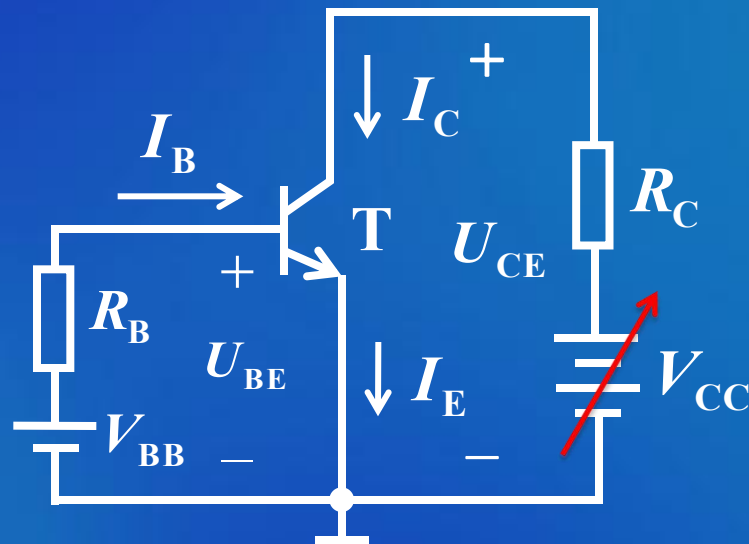
## 2. 发射结正向偏置、集电结正向偏置—饱和状态

不断降低  $V_{CC}$  的电压值，若

$U_{CB} (=U_{CE}-U_{BE}) \leq 0$ ，管子进入饱和态

饱和状态的特点：

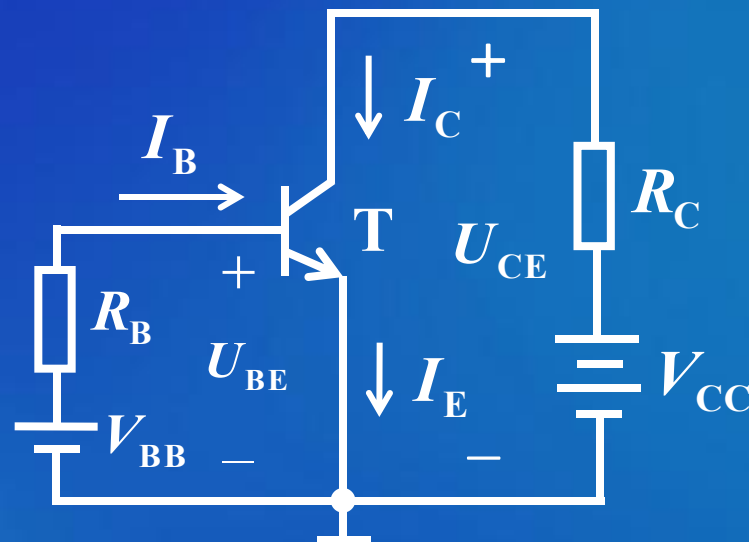
- (1) 集电结零偏或正偏
- (2)  $I_C \neq \beta I_B$ ， $I_B$  失去了对  $I_C$  的控制。
- (3) 集电极饱和电压降  $U_{CES}$  较小  
小功率硅管  $0.3 \sim 0.5V$ 。



## (4) 饱和时集电极电流

$$I_{CS} = (V_{CC} - U_{CES}) / R_C$$

(5)  $U_{CE}$  对  $I_C$  的影响大，  
当  $U_{CE}$  增大， $I_C$  将随之增加。



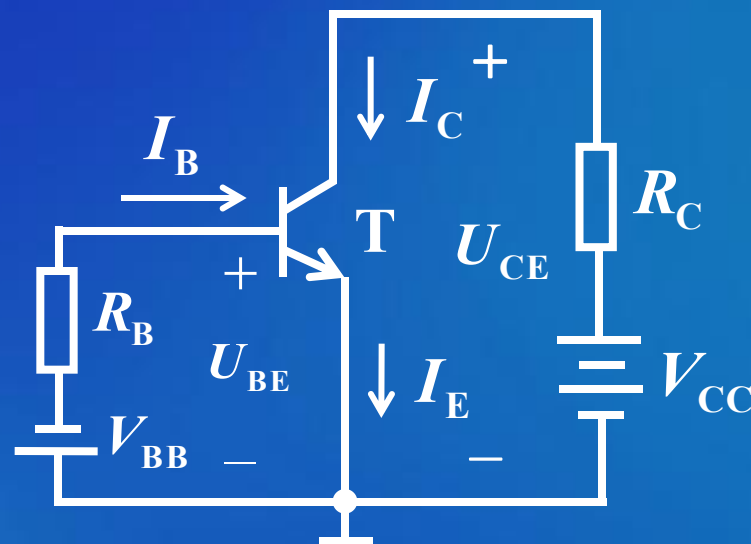
**原因：**当  $U_{CE}$  增大使集电结从正偏往零偏变化过程中， $U_{CE}$  越大，到达集电区的非平衡少子就越多， $I_C$  将随着  $U_{CE}$  增大而增加。

### 3 . 发射结反向偏置、集电结反向偏置—截止状态

截止状态的特点：

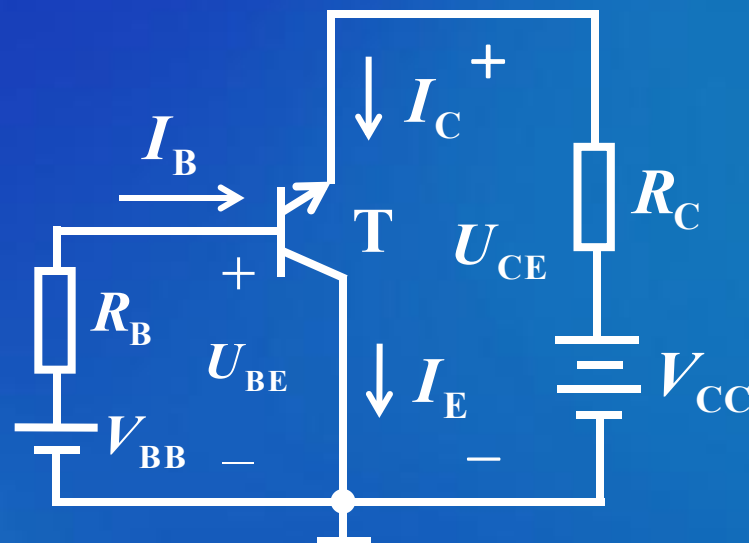
(1)  $U_{BE}$  小于死区电压  
或者反偏。

(2)  $I_C = I_{CBO}$  ,  $I_B = -I_{CBO}$

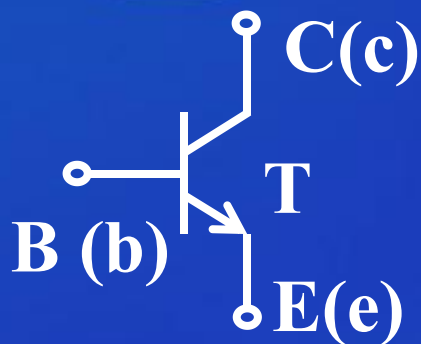


## 4. 发射结反向偏置、集电结正向偏置——倒置状态

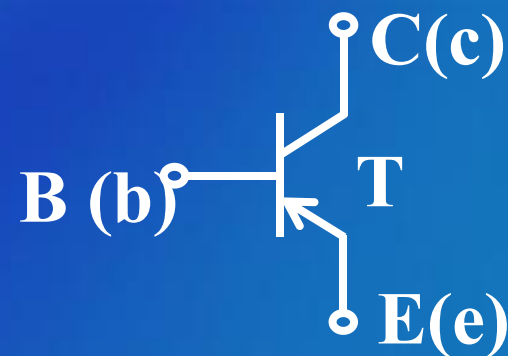
特点:



- (1) 集电区扩散到基区的多子较少。
- (2) 发射区收集基区的非平衡少数载流子的能力小。
- (3) 电流放大系数很小。



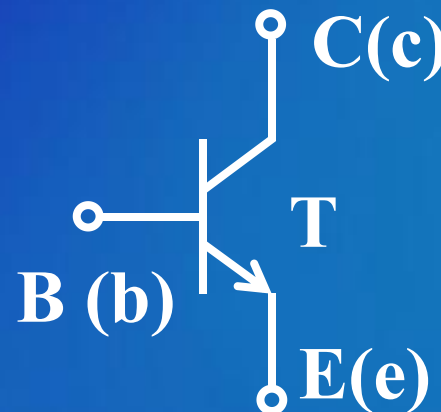
# 总 结



	放大	饱和	截止	倒置
发射结	正	正	反	反
集电结	反	正	反	正

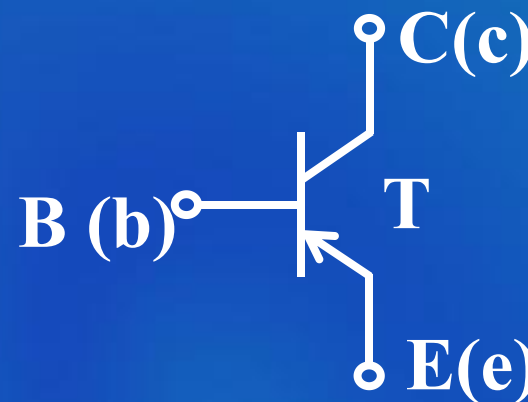
# 放大状态下晶体管各极电位关系

• NPN管 :  $U_C \gg U_B > U_E$



$|U_{BE}|=0.7V$ ----Si     $|U_{BE}|=0.3V$ ----Ge

• PNP管 :  $U_C << U_B < U_E$



## 总结：

晶体管的工作状态  
及放大原理



晶体管的放大、饱和、截止及倒置



晶体管放大的原理及条件

内部条件

外部条件

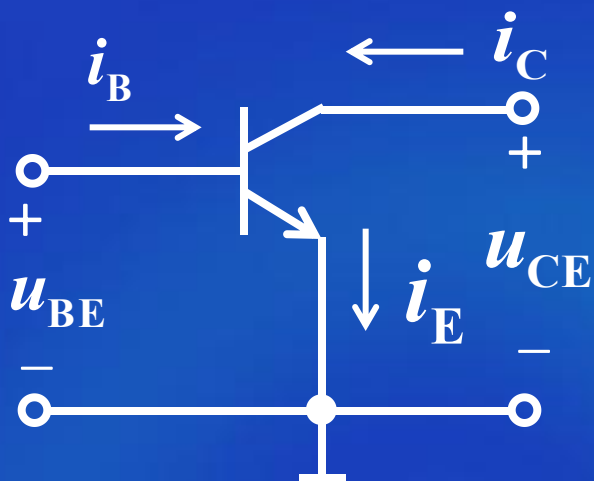


晶体管电流放大特性



## 2.1.3 半导体三极管共射极接法的伏安特性曲线

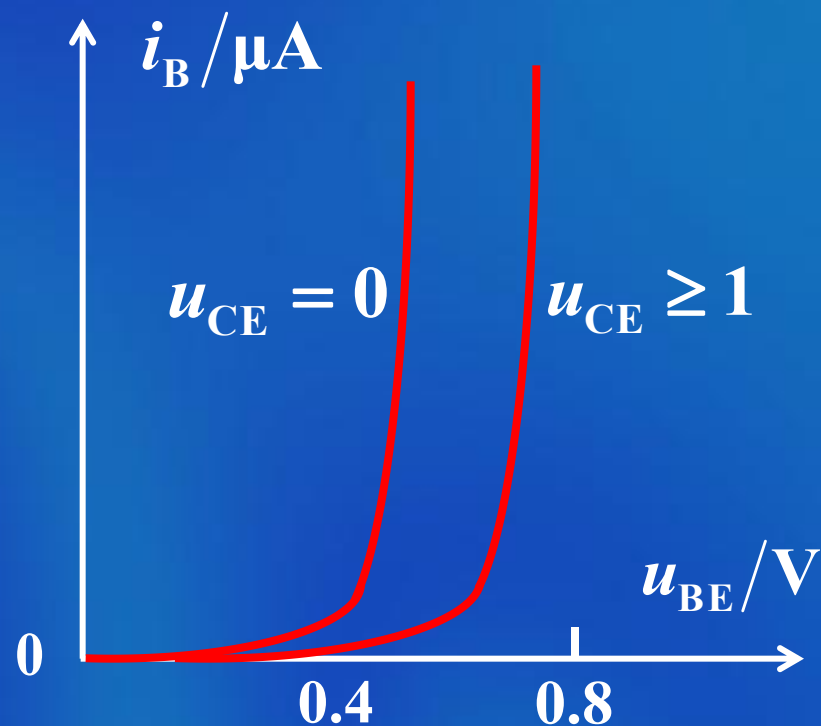
### 三极管共射极接法



### 1. 共射极输入特性

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{u_{CE} \text{一定}}$$

### 共射极输入特性

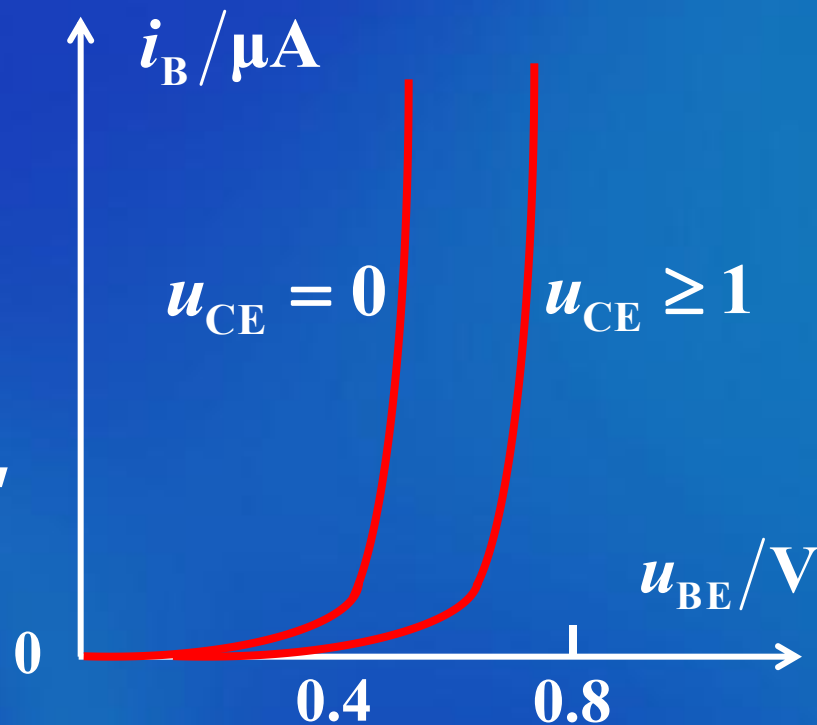


## 输入特性的特点：

(1) 输入特性是非线性的，有死区。

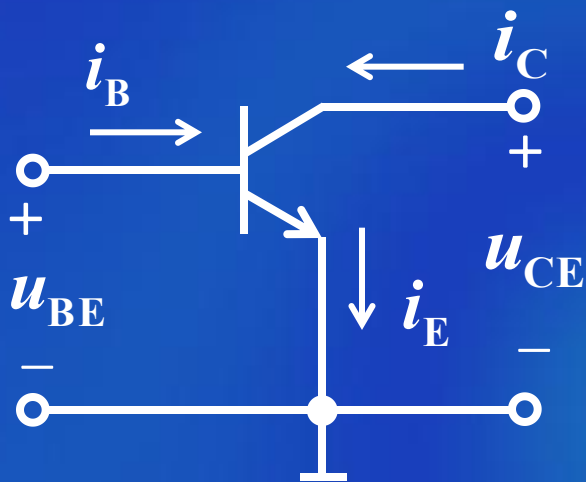
(2) 当 $u_{BE}$ 不变， $u_{CE}$ 从零增大， $i_B$ 减小。

(3) 当 $u_{CE} \geq 1V$ ，输入特性曲线几乎重合在一起， $u_{CE}$ 对输入特性几乎无影响。



## 2. 共射极输出特性

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B \text{一定}}$$

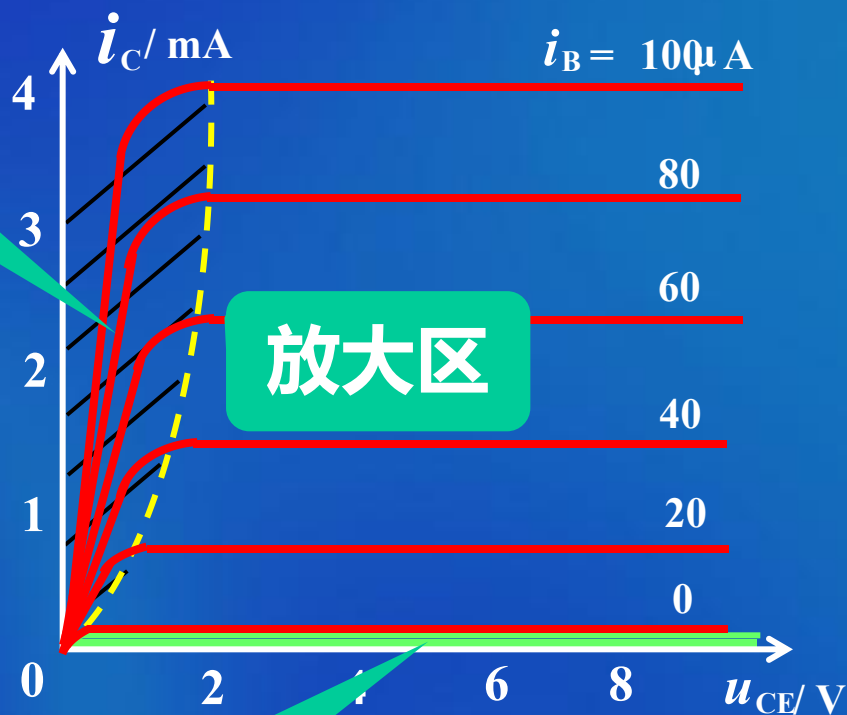


### 输出特性曲线

饱和区

放大区

截止区



## 各区的特点：

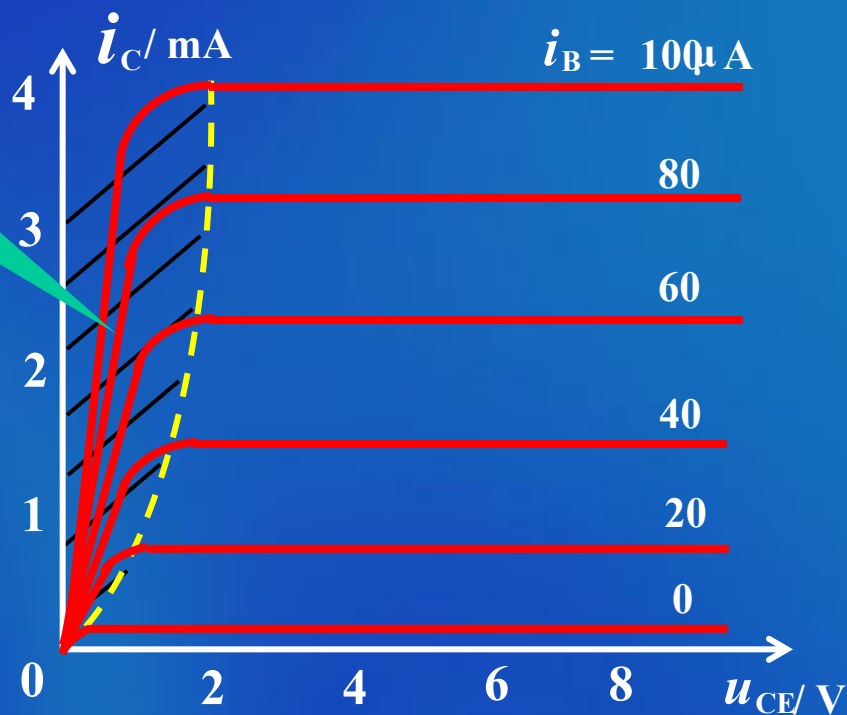
## (1) 饱和区

a.  $U_{CE} \leq U_{BE}$

b.  $I_C < \beta I_B$

c.  $U_{CE}$  增大,  $I_C$  增大。

饱和区



## (2) 放大区

a.  $U_{CE} > U_{BE}$

b.  $I_C = \beta I_B$

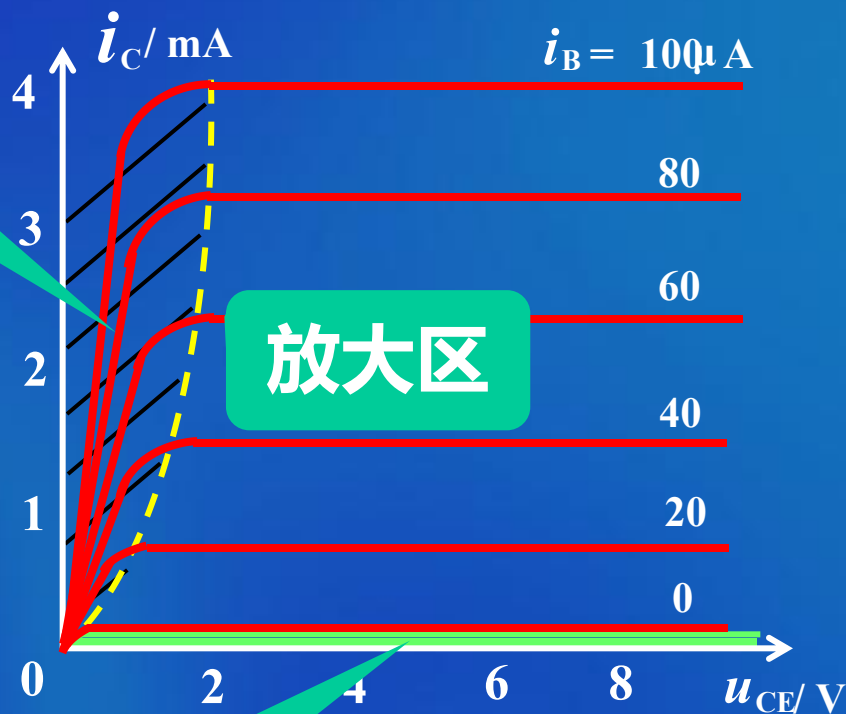
c.  $I_C$  与  $U_{CE}$  无关

## (3) 截止区

a.  $U_{BE} < \text{死区电压}$

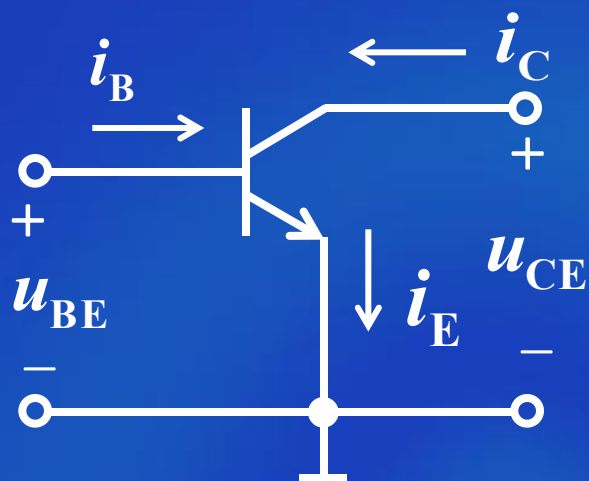
b.  $I_B \approx 0$

c.  $I_C \approx 0$

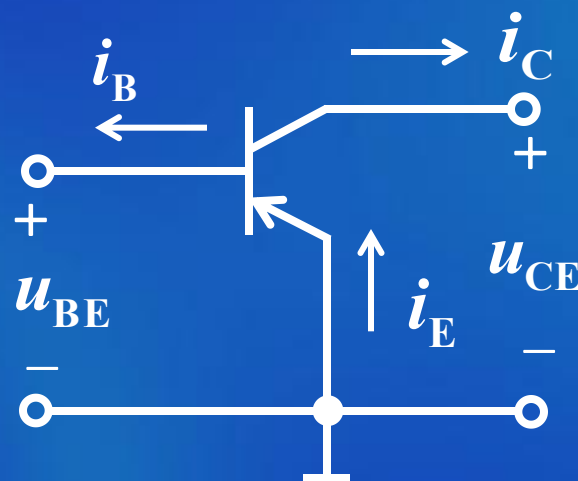


# NPN管与PNP型管的区别

## NPN管电路



## PNP管电路



$i_B$ 、 $u_{BE}$ 、 $i_C$ 、 $i_E$ 、 $u_{CE}$ 的极性二者相反

## 硅管与锗管的区别:

(1) 死区电压约为  $\left\{ \begin{array}{l} \text{硅管} 0.5 \text{ V} \\ \text{锗管} 0.1 \text{ V} \end{array} \right.$

(2) 导通压降  $|u_{\text{BE}}|$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{硅管} 0.7 \text{ V} \\ \text{锗管} 0.3 \text{ V} \end{array} \right.$

(3) 锗管的  $I_{\text{CBO}}$  比硅管大

## 2.1.4 半导体三极管的主要电参数

### 1. 直流参数

(1) 共基极直流电流放大系数  $\bar{\alpha}$   $\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{I_{CBO}=0}$

(2) 共射极直流电流放大系数  $\bar{\beta}$   $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{I_{CBO}=0}$

(3) 发射极开路，集电极——基极间反向饱和电流  
 $I_{CBO}$

(4) 基极开路，集电极——发射极间反向饱和电流  
 $I_{CEO}$



## 2. 交流参数

(1) 共基极交流电流放大系数 $\alpha$

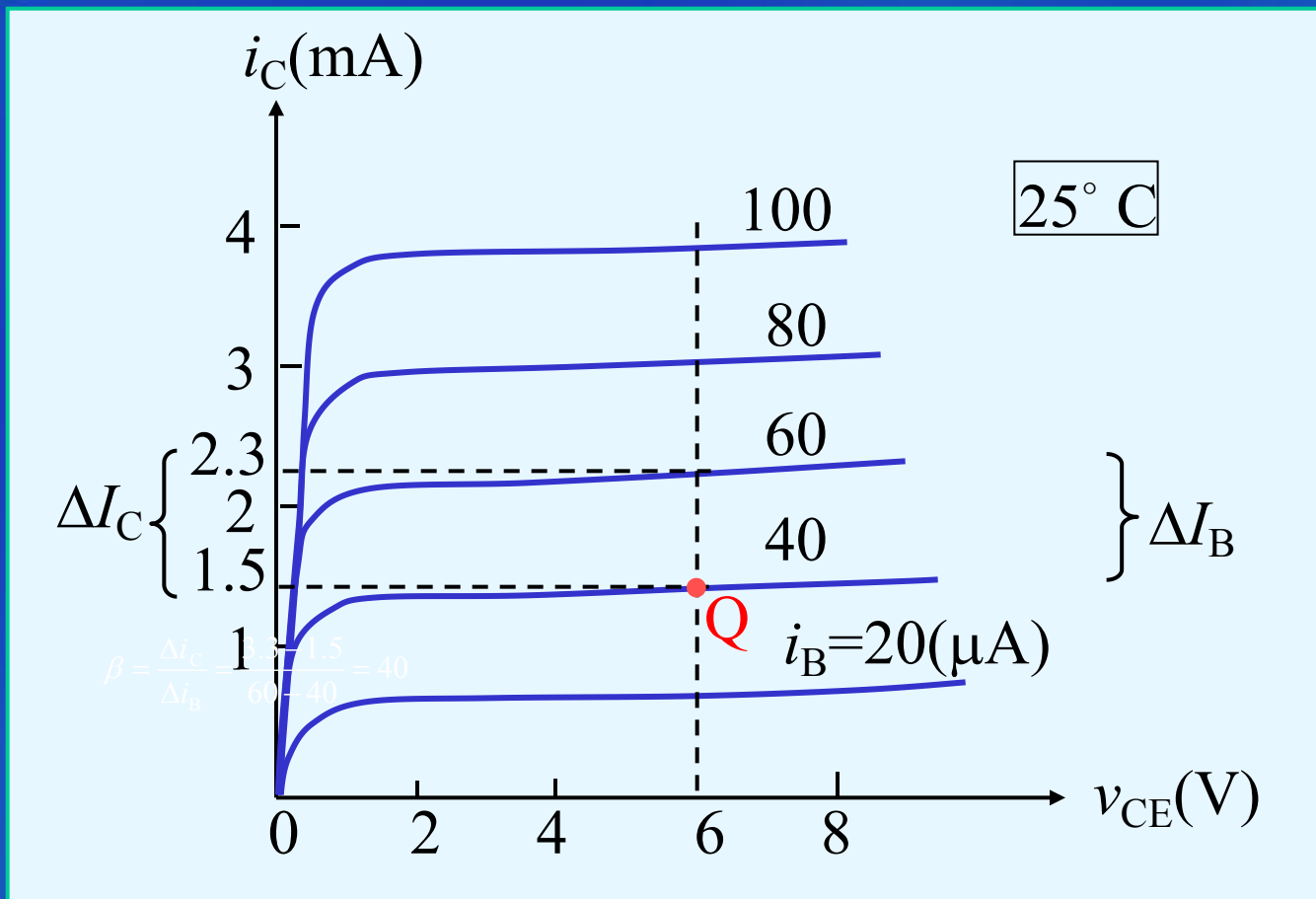
$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

(2) 共射极交流电流放大系数 $\beta$

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \neq \text{常数}$$

$\beta$ 值与 $i_C$ 的  
关系曲线





$$\bar{\beta} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}} = \frac{1.5\text{mA}}{40\mu\text{A}} = 37.5$$

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{2.3 - 1.5}{60 - 40} = 40$$

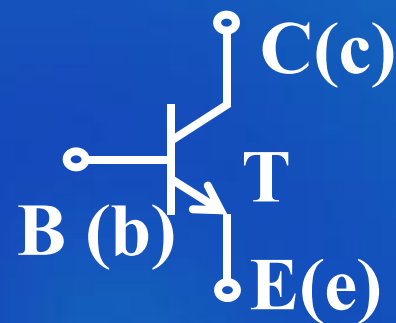
### 3. 极限参数

(1) 集电极开路时发射极——基极间反向击穿电压  $U_{(BR)EBO}$

(2) 发射极开路时集电极——基极间反向击穿电压  $U_{(BR)CBO}$

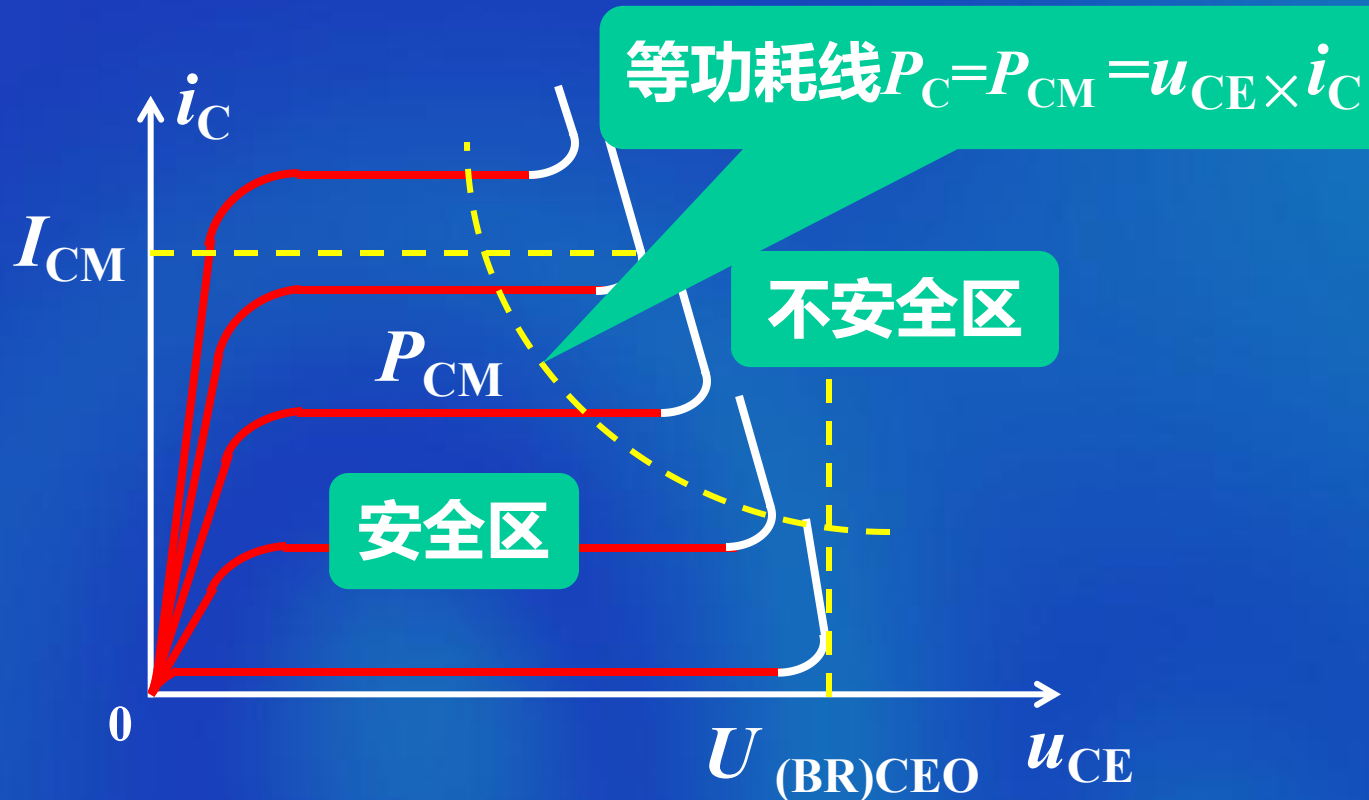
(3) 基极开路时集电极——发射极间反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$

(4) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$



## (5) 集电极最大允许功率耗散 $P_{CM}$

### 晶体管的安全工作区



## 2.1.5 温度对管子参数的影响

### 1 . 对 $\beta$ 的影响

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} / \Delta T = (0.5 \sim 1)\% / ^\circ C$$

### 2 . 对 $I_{CBO}$ 的影响

$$I_{CBO(T)} = I_{CBO(T_0)} 2^{\frac{T-T_0}{10}}$$

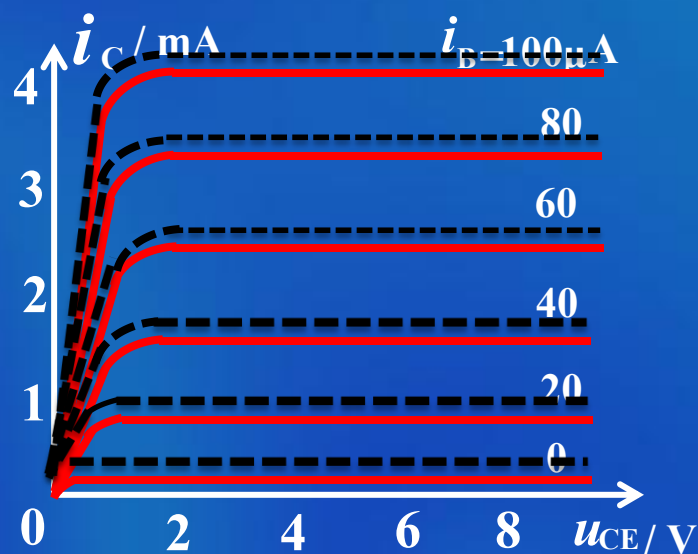
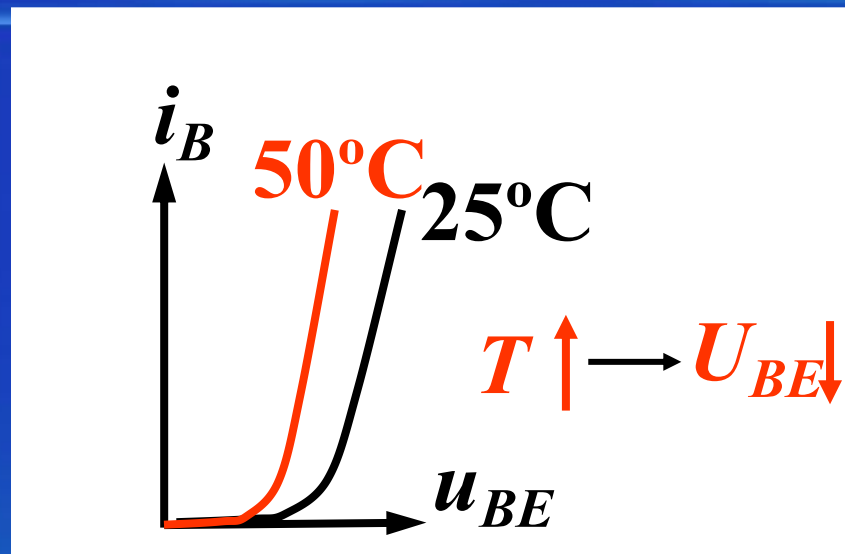
### 3 . 对 $U_{BE}$ 的影响

$$\frac{\Delta U_{BE}}{|U_{BE}| \Delta T} = -(2 \sim 2.5)\text{mV} / ^\circ C$$

### 3. 对 $U_{BE}$ 的影响

温度对管子参数的影响:

$$T \uparrow \left\{ \begin{array}{l} \beta \uparrow \\ I_{CBO} \uparrow \\ U_{BE} \downarrow \end{array} \right\} \rightarrow I_C \uparrow$$



温度升高时，晶体管输出特性曲线将**上移**

## 思考题

1. 晶体管为什么有电流放大作用？它是如何实现信号放大的？
2. 晶体管的发射极和集电极是否可以调换使用？
3. 为什么晶体管基区掺杂浓度小而且做的很薄？
4. 晶体管在输出特性曲线的饱和区工作时，其电流放大系数和在放大区工作时是否一样大？