



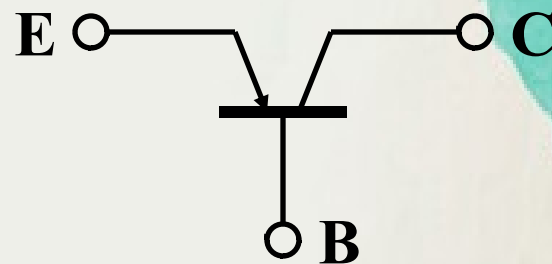
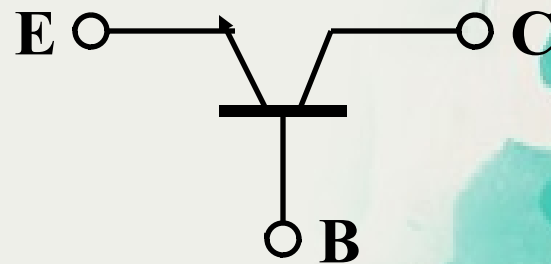
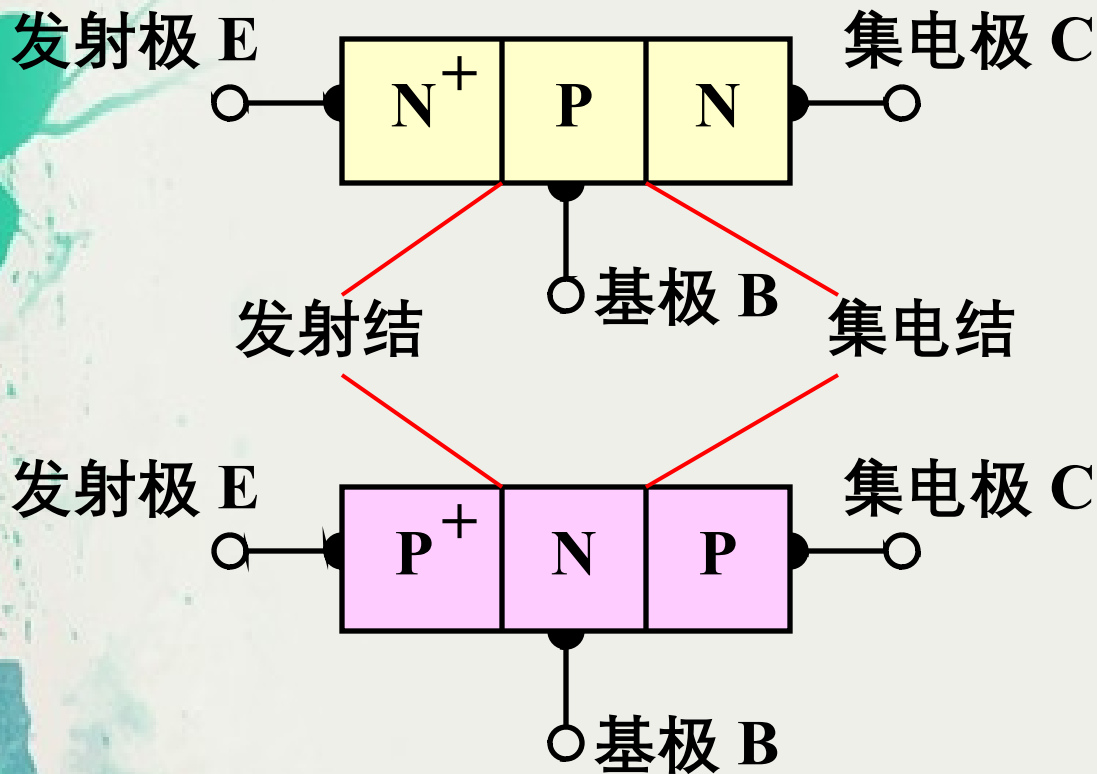
# 第 2 章 晶体三极管

---

- 2.1 放大模式下晶体三极管的工作原理
- 2.2 晶体三极管的其他工作模式
- 2.3 埃伯尔斯—
- 2.4 晶体三极管伏安特性曲线
- 2.5 晶体三极管小信号电路模型
- 2.6 晶体三极管电路分析方法
- 2.7 晶体三极管的应用原理

# 概述

## 三极管结构及电路符号



## ➤ 三极管内部结构特点

1) 发射区高掺杂。 2) 基区很薄。 3) 集电结面积大。

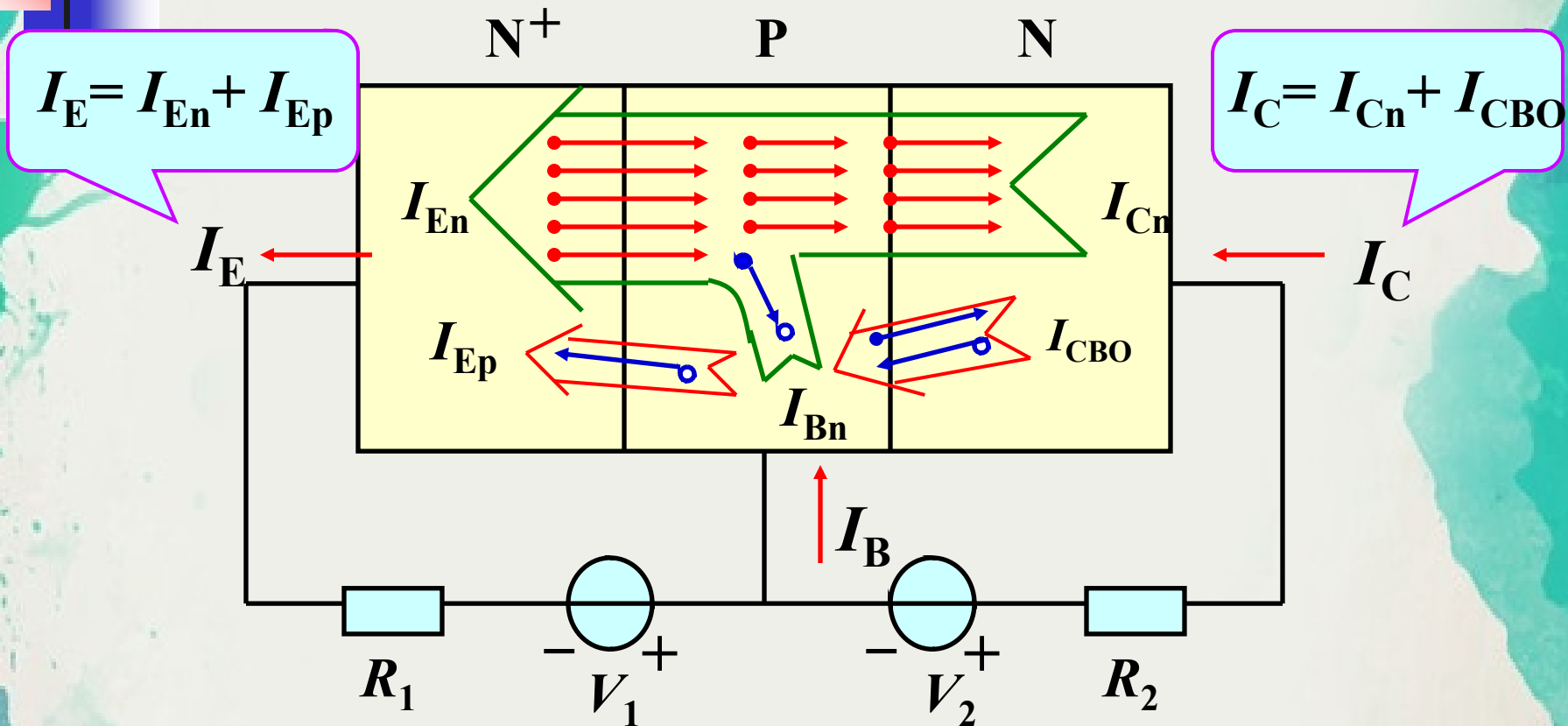
## ➤ 三极管三种工作模式

- 放大模式： 发射结正偏， 集电结反偏。
- 饱和模式： 发射结正偏， 集电结正偏。
- 截止模式： 发射结反偏， 集电结反偏。

注意：三极管具有正向受控作用，除了满足内部结构特点外，还必须满足放大模式的外部工作条件。

## 2.1 放大模式下三极管工作原理

### 2.1.1 内部载流子传输过程



$$I_B = I_{Ep} + I_{Bn} - I_{CBO} = I_{Ep} + (I_{En} - I_{Cn}) - I_{CBO} = I_E - I_C$$

□ 发射结正偏：保证发射区向基区发射多子。

▪ 发射区掺杂浓度  $\gg$  基区：减少基区向发射区发射的多子，提高发射效率。

□ 基区的作用：将发射到基区的多子，自发射结传输到集电结边界。

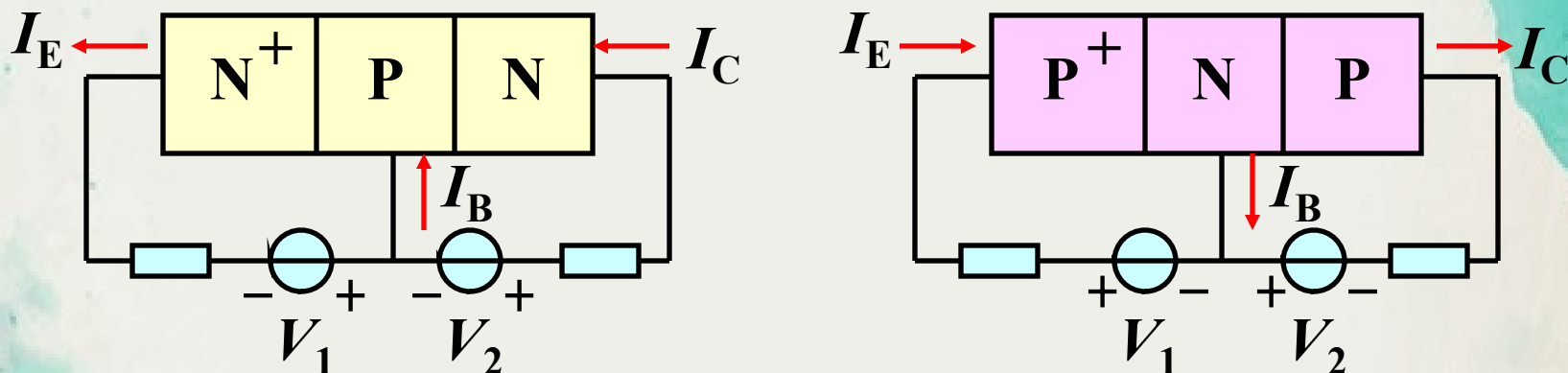
▪ 基区很薄：可减少多子传输过程中在基区的复合机会，保证绝大部分载流子扩散到集电结边界。

□ 集电结反偏、且集电结面积大：保证扩散到集电结边界的载流子全部漂移到集电区，形成受控的集电极电流。

## ▶ 三极管特性——具有正向受控作用

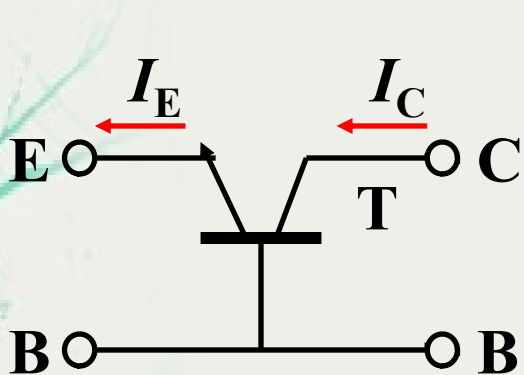
即三极管输出的集电极电流  $I_C$ ，主要受正向发射结电压  $V_{BE}$  的控制，而与反向集电结电压  $V_{CE}$  近似无关。

注意：NPN 型管与 PNP 型管工作原理相似，但由于它们形成电流的载流子性质不同，结果导致各极电流方向相反，加在各极上的电压极性相反。

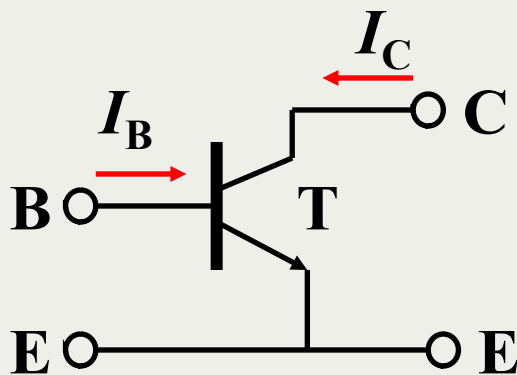


## 2.1.2 电流传输方程

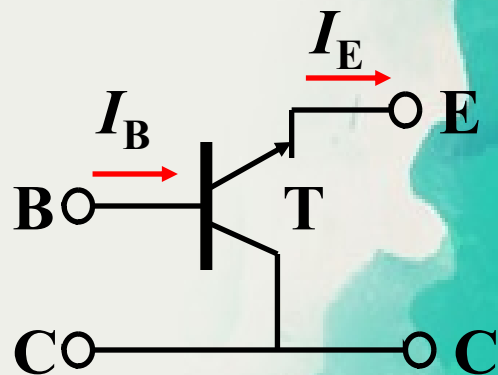
### 三极管的三种连接方式——三种组态



(共基极)



(共发射极)



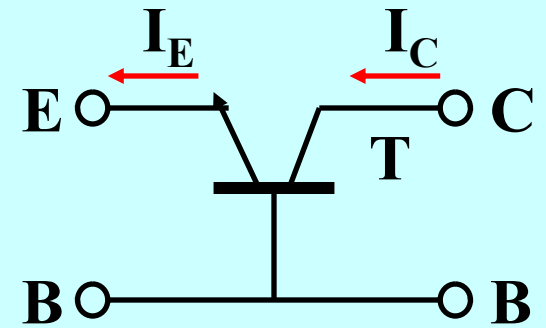
(共集电极)

- 放大电路的组态是针对交流信号而言的。
- 观察输入信号作用在哪个电极上，输出信号从哪个电极取出，此外的另一个电极即为组态形式。

## 共基极直流电流传输方程

直流电流传输系数:

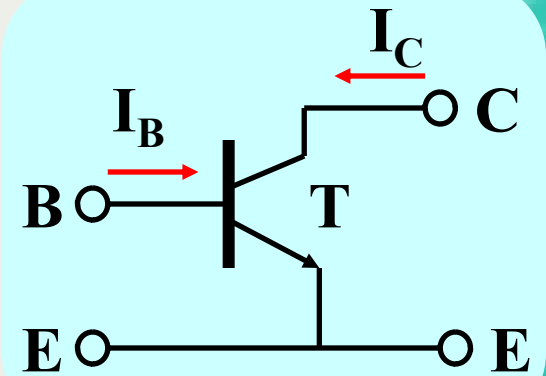
$$\bar{\alpha} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E}$$



直流电流传输方程:  $I_C = \bar{\alpha}I_E + I_{CBO} \approx \bar{\alpha}I_E$

## 共发射极直流电流传输方程

$$\begin{cases} I_C = \bar{\alpha}I_E + I_{CBO} \\ I_E = I_B + I_C \end{cases}$$



直流电流传输方程:  $I_C = \bar{\beta}I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta}I_B$

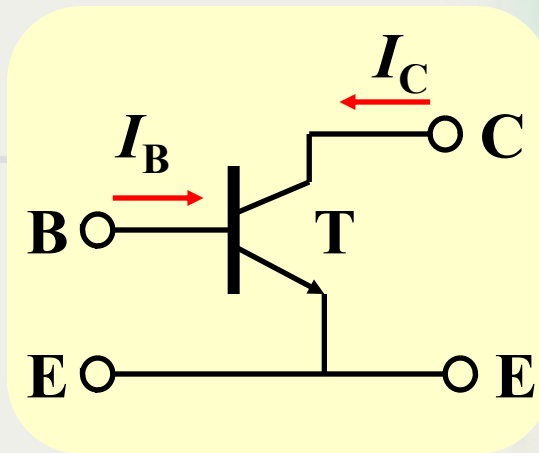
其中:  $\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$

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



➤  $\bar{\beta}$  的物理含义:

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} = \frac{I_{Cn} / I_E}{1 - I_{Cn} / I_E}$$
$$= \frac{I_{Cn}}{I_E - I_{Cn}} \approx \frac{I_{Cn}}{I_{Bn}}$$



$\bar{\beta}$  表示，受发射结电压控制的复合电流  $I_{Bn}$ ，对集电极正向受控电流  $I_{cn}$  的控制能力。

若忽略  $I_{CBO}$ ，则：
$$\bar{\beta} = \frac{I_{Cn}}{I_E - I_{Cn}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

可见， $\bar{\beta}$  为共发射极电流放大系数。

## ➤ $I_{CEO}$ 的物理含义:

$I_{CEO}$  指基极开路时，集电极直通到发射极的电流。

$$\because I_B = 0$$

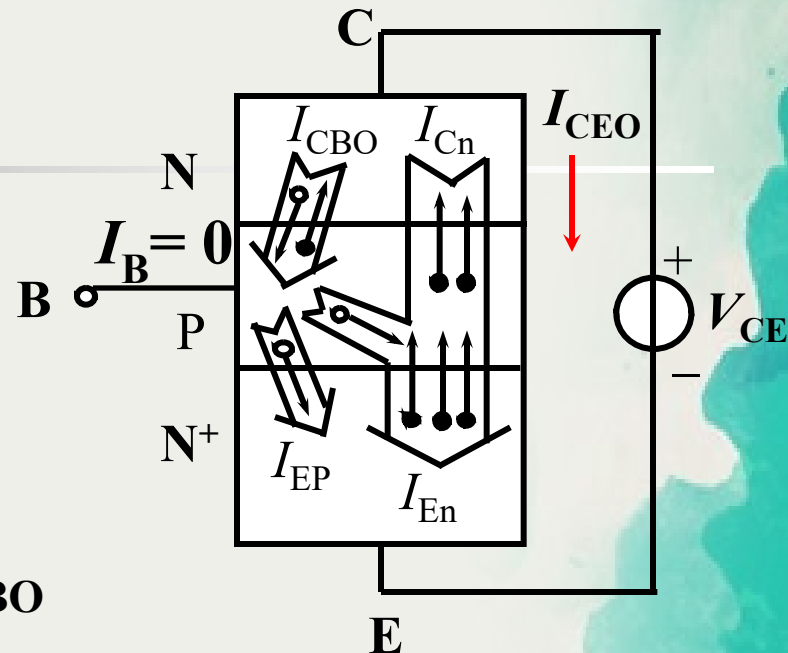
$$\therefore I_{Ep} + (I_{En} - I_{Cn}) = I_E - I_{Cn} = I_{CBO}$$

即

$$\bar{\beta} = \frac{I_{Cn}}{I_E - I_{Cn}} = \frac{I_{Cn}}{I_{CBO}}$$

因此

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



## 2.1.3 放大模式下三极管的模型

### 数学模型(指数模型)

三极管的正向受控作用，服从指数函数关系式：

$$I_C \approx \bar{\alpha} I_E = \bar{\alpha} I_{EBS} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}}$$

式中

$$I_S = \bar{\alpha} I_{EBS}$$

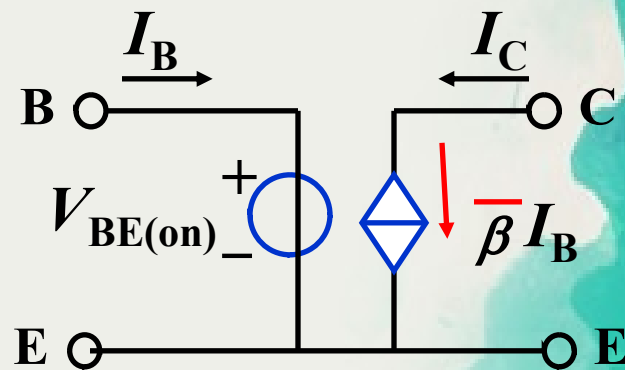
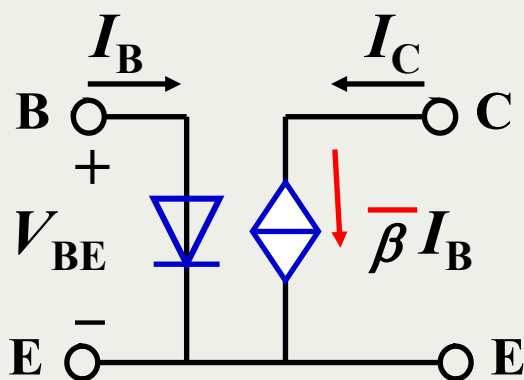
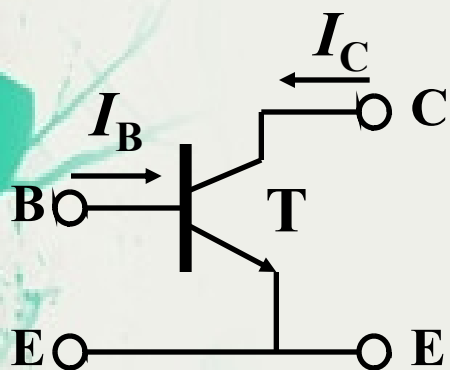
$I_S$  指发射结反向饱和电流  $I_{EBS}$  转化到集电极上的电流值，它不同于二极管的反向饱和电流  $I_S$ 。

## 放大模式直流简化电路模型

共发射极

电路模型

直流简化电路模型



$V_{BE(on)}$  为发射结导通电压，工程上一般取：

- 硅管  $V_{BE(on)} = 0.7 \text{ V}$
- 锗管  $V_{BE(on)} = 0.25 \text{ V}$

## ❖ 三极管参数的温度特性

□ 温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ， $\Delta\beta/\beta$  增大  $(0.5 \sim 1)\%$ ，即

$$\frac{\Delta\bar{\beta}}{\beta T} = (0.005 \sim 0.01) / ^{\circ}\text{C}$$

□ 温度每升高  $1^{\circ}\text{C}$ ， $V_{\text{BE(on)}}$  减小  $(2 \sim 2.5) \text{ mV}$ ，即

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

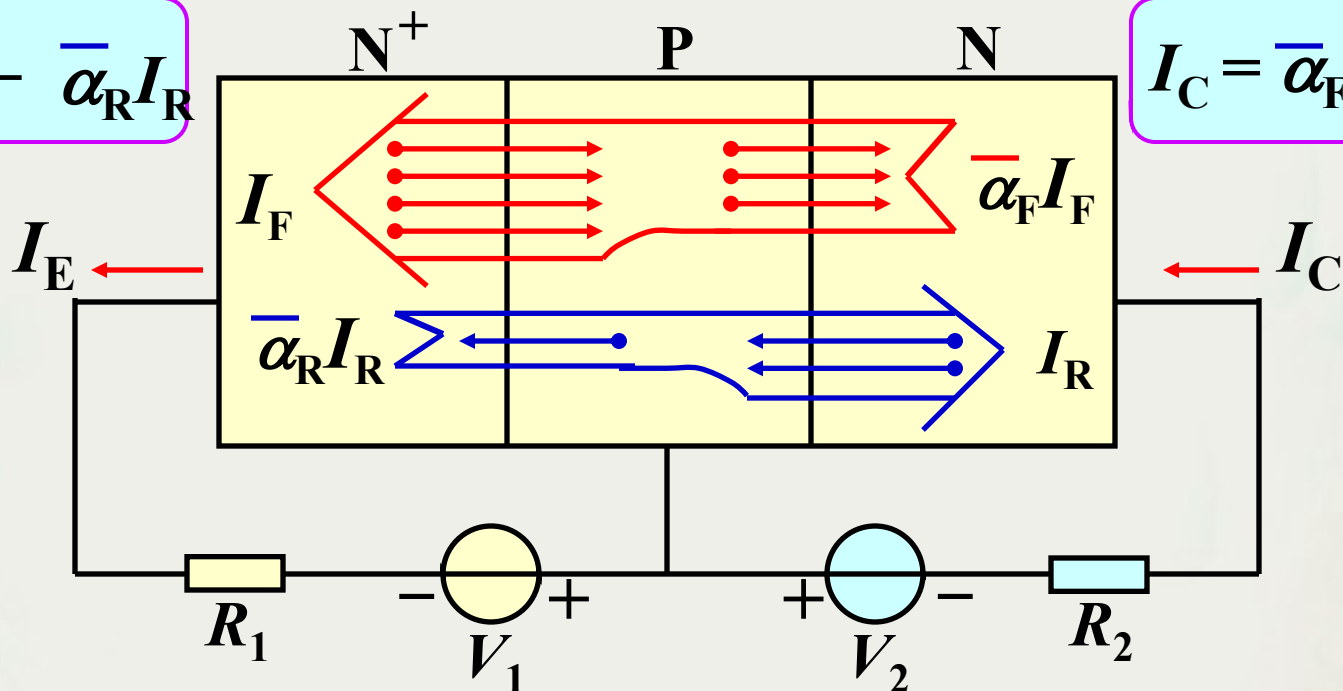
□ 温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ， $I_{\text{CBO}}$  增大一倍，即

$$I_{\text{CBO}}(T_2) = I_{\text{CBO}}(T_1) \times 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}}$$

## 2.2 晶体三极管的其他工作模式

### 2.2.1 饱和模式 (E 结正偏, C 结正偏)

$$I_E = I_F - \bar{\alpha}_R I_R$$



$$I_C = \bar{\alpha}_F I_F - I_R$$

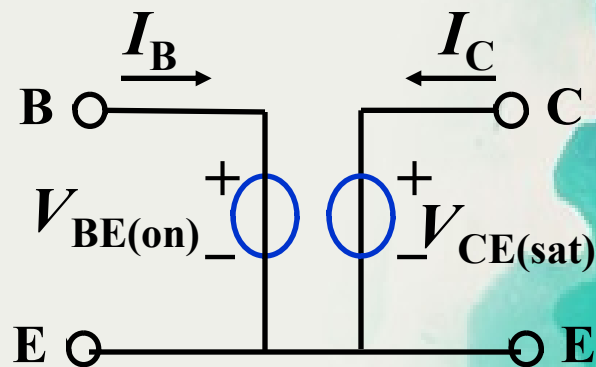
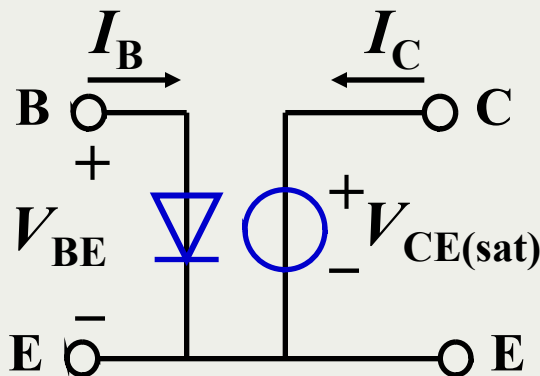
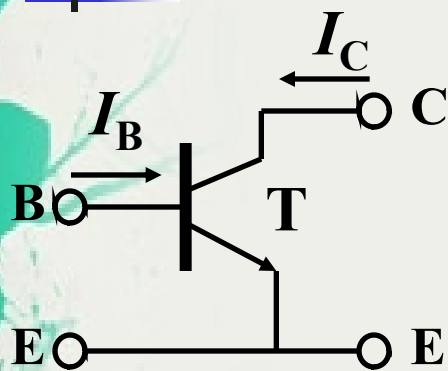
结论：三极管失去正向受控作用。

## 饱和模式直流简化电路模型

### 共发射极

### 电路模型

### 直流简化电路模型



通常，饱和压降  $V_{CE(sat)}$

硅管  $V_{CE(sat)} \approx 0.3 \text{ V}$

锗管  $V_{CE(sat)} \approx 0.1 \text{ V}$

若忽略饱和压降，三极管输出端近似短路。

即三极管工作于饱和模式时，相当于开关闭合。

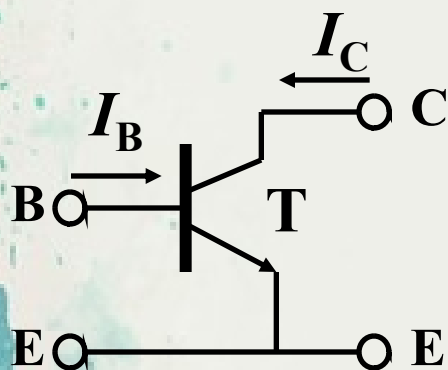
## 2.2.2 截止模式 (E 结反偏, C 结反偏)

若忽略反向饱和电流, 三极管  $I_B \approx 0$ ,  $I_C \approx 0$ 。

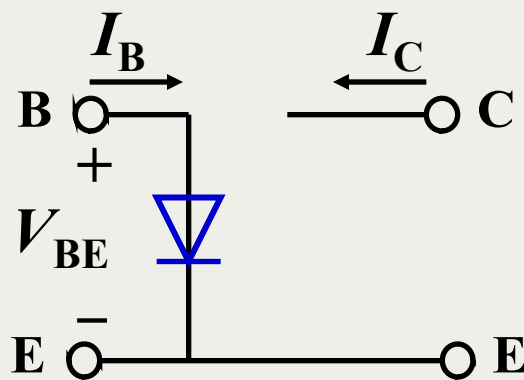
即三极管工作于截止模式时, 相当于开关断开。

### ➤ 截止模式直流简化电路模型

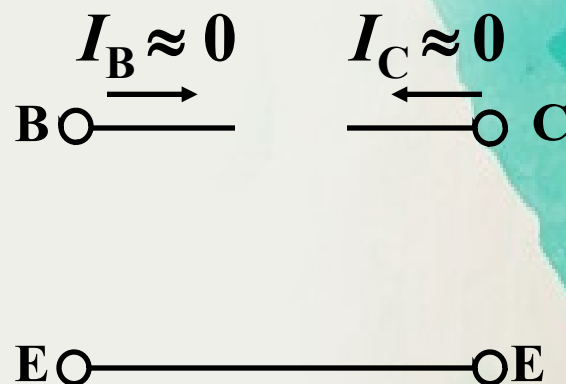
#### 共发射极



#### 电路模型



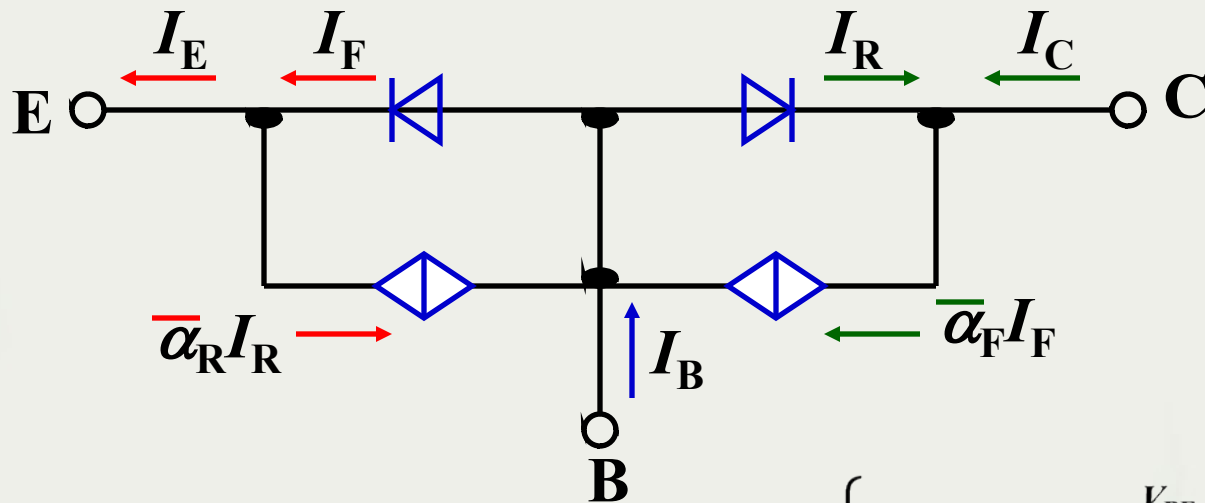
#### 直流简化电路模型





## 2.3 埃伯尔斯—莫尔模型

埃伯尔斯—莫尔模型是三极管通用模型，它适用于任何工作模式。



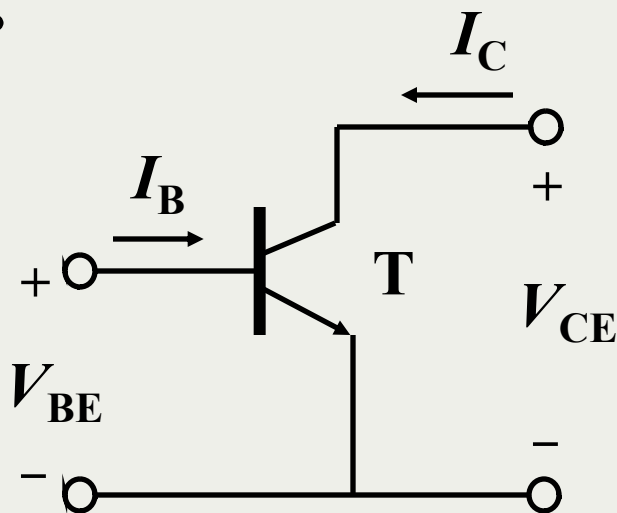
$$\begin{cases} I_E = I_F - \bar{\alpha}_R I_R \\ I_C = \bar{\alpha}_F I_F - I_R \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} I_F = I_{EBS} \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \\ I_R = I_{CBS} \left( e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} - 1 \right) \end{cases}$$

## 2.4 晶体三极管伏安特性曲线

伏安特性曲线是三极管通用的曲线模型，它适用于任何工作模式。



共发射极

输入特性： $I_B = f_{1E}(V_{BE})$  |  $V_{CE} = \text{常数}$

输出特性： $I_C = f_{2E}(V_{CE})$  |  $I_B = \text{常数}$

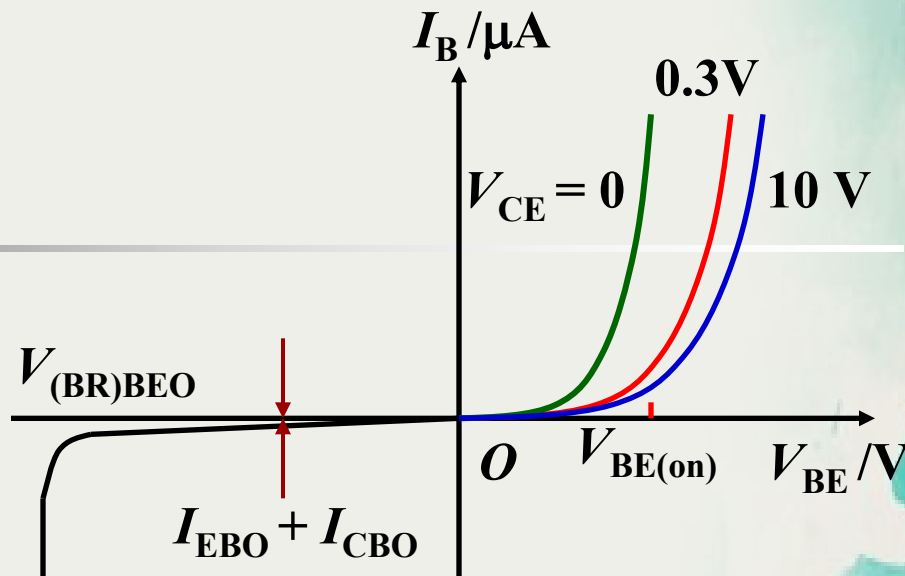
## ➤ 输入特性曲线

□  $V_{CE}$  一定:

类似二极管伏安特性。

□  $V_{CE}$  增加:

正向特性曲线略右移。



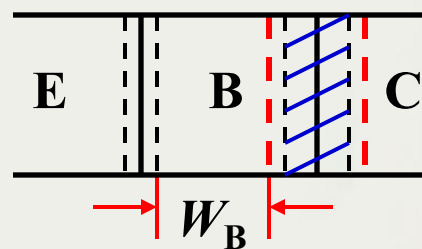
由于  $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$

因此当  $V_{BE}$  一定时:

$V_{CE} \uparrow \rightarrow V_{CB} \uparrow \rightarrow W_B \downarrow \rightarrow$  复合机会  $\downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow$  曲线右移。

注:  $V_{CE} > 0.3 \text{ V}$  后, 曲线移动可忽略不计。

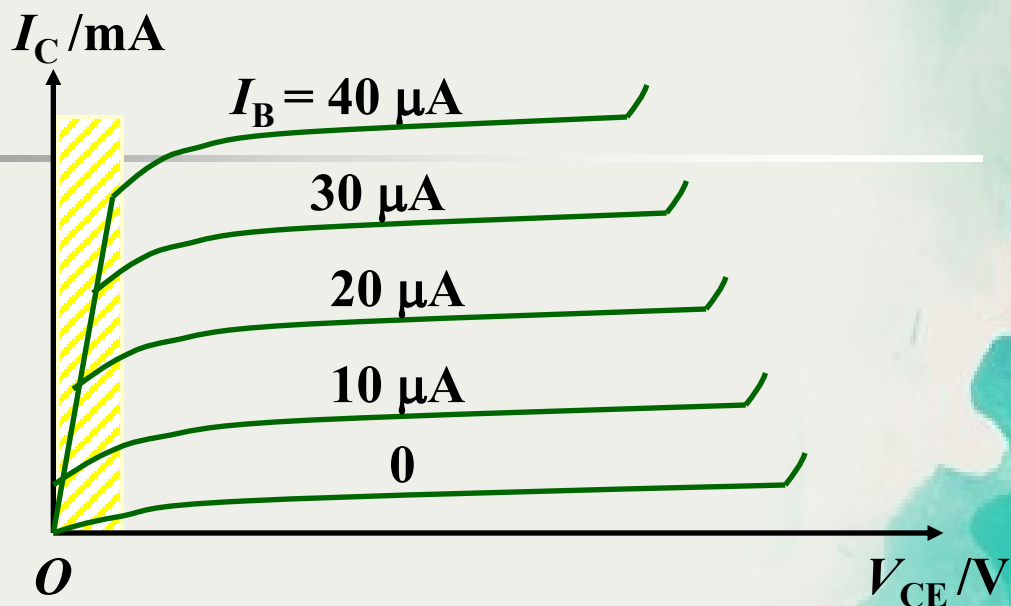
### 基区宽度调制效应



## ➤ 输出特性曲线

输出特性曲线可  
划分为四个区域：

饱和区、放大区、  
截止区、击穿区。



□ 饱和区 ( $V_{BE} \geq 0.7 \text{ V}$ ,  $V_{CE} < 0.3 \text{ V}$ )

条件： 发射结正偏， 集电结正偏。

特点：  $I_C$  不受  $I_B$  控制， 而受  $V_{CE}$  影响。

$V_{CE}$  略增，  $I_C$  显著增加。

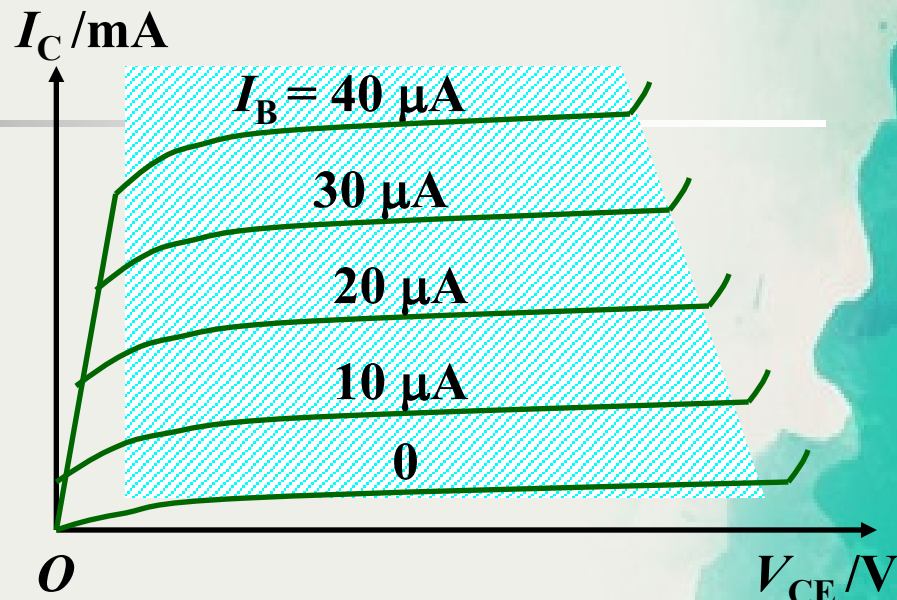
□ 放大区 ( $V_{BE} \geq 0.7 \text{ V}$ ,  $V_{CE} > 0.3 \text{ V}$ )

条件

发射结正偏  
集电结反偏

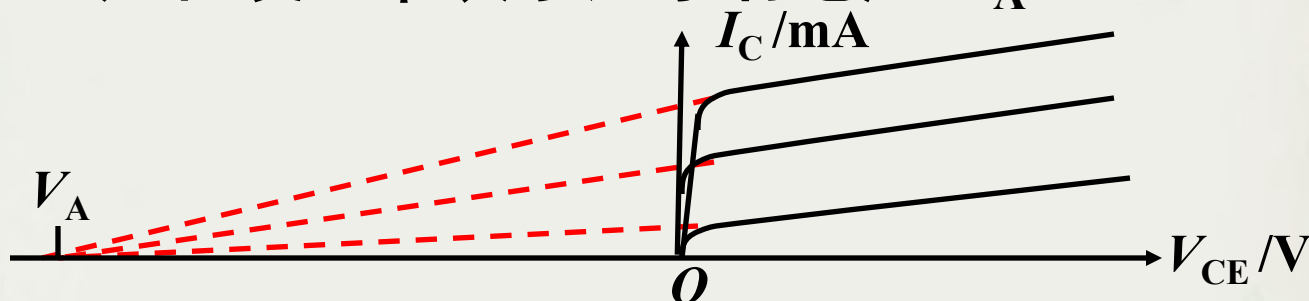
特点

具有正向受控作用  
满足  $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$   
 $V_{CE} \uparrow \rightarrow$  曲线略上翘



说明

上翘原因—基区宽度调制效应 ( $V_{CE} \uparrow \rightarrow I_C$  略  $\uparrow$ )  
上翘程度—取决于厄尔利电压  $V_A$



基宽  $W_B$  越小  $\rightarrow$  调制效应对  $I_C$  影响越大  $\rightarrow$  则  $|V_A|$  越小。

在考虑三极管基区宽度调制效应时，电流  $I_C$  的修正方程

$$I_C \approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \left(1 - \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$

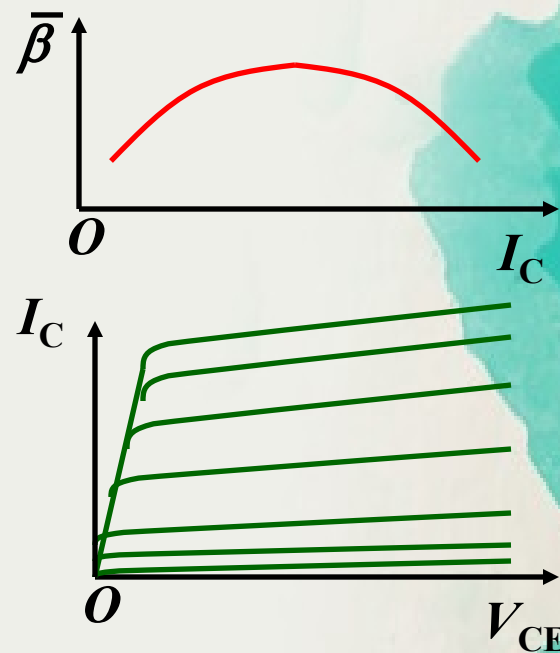
$\bar{\beta}$  与  $I_C$  的关系：

在  $I_C$  一定范围内  $\rightarrow \bar{\beta}$  近似为常数。

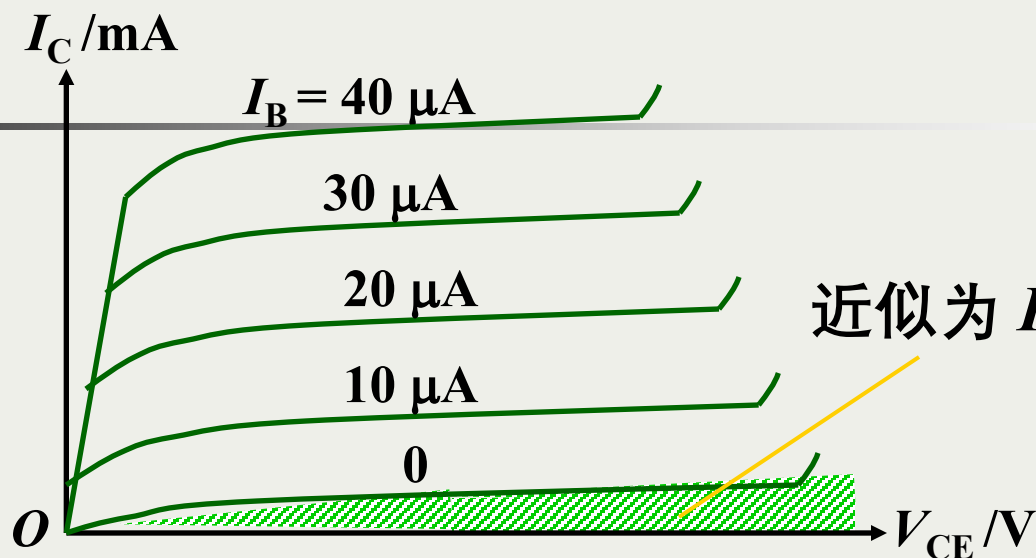
$I_C$  过小  $\rightarrow$  使  $I_B \uparrow \rightarrow$  造成  $\bar{\beta} \downarrow$ 。

$I_C$  过大  $\rightarrow$  发射效率  $\downarrow \rightarrow$  造成  $\bar{\beta} \downarrow$ 。

考虑上述因素， $I_B$  等量增加时，  
输出曲线不再等间隔平行上移。



□ 截止区 ( $V_{BE} \leq 0.5 \text{ V}$ ,  $V_{CE} \geq 0.3 \text{ V}$ )



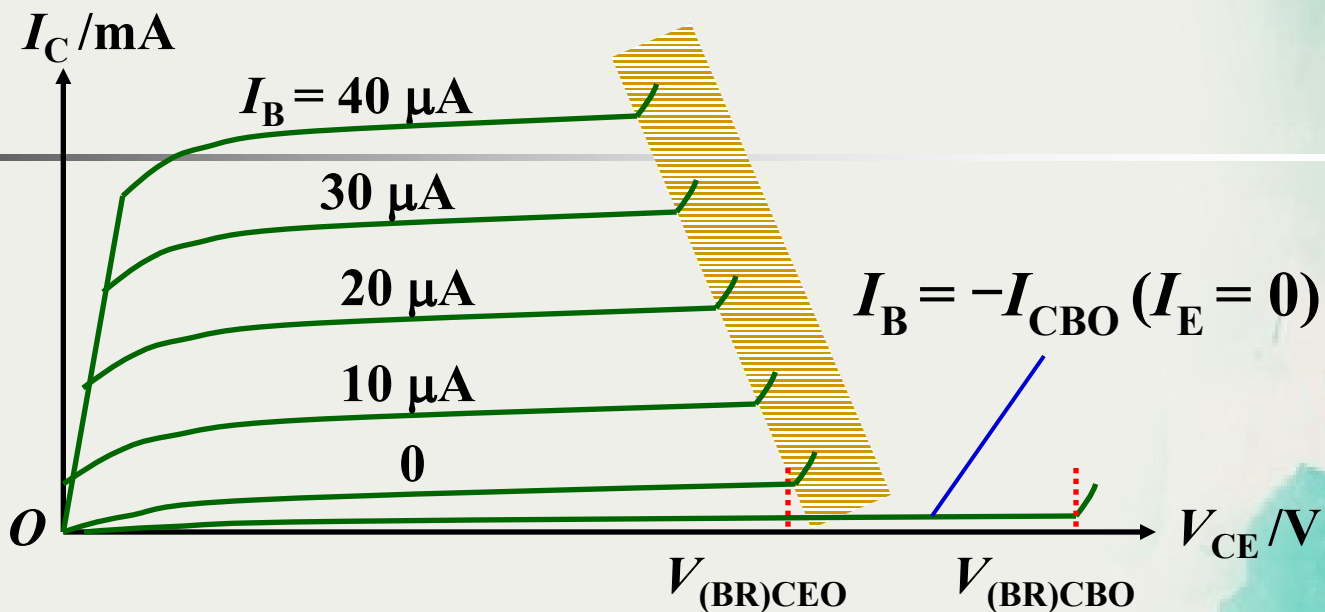
条件： 发射结反偏，集电结反偏。

特点：  $I_C \approx 0$ ,  $I_B \approx 0$

严格说，截止区应是  $I_E = 0$  即  $I_B = -I_{CBO}$  以下的区域。

因为  $I_B$  在  $0 \sim -I_{CBO}$  时，仍满足  $I_C = \bar{\beta}I_B + (1 + \bar{\beta})I_{CBO}$

# □ 击穿区



特点：

$V_{CE}$  增大到一定值时，集电结反向击穿， $I_C$  急剧增大。

注意：集电结反向击穿电压，随  $I_B$  的增大而减小。

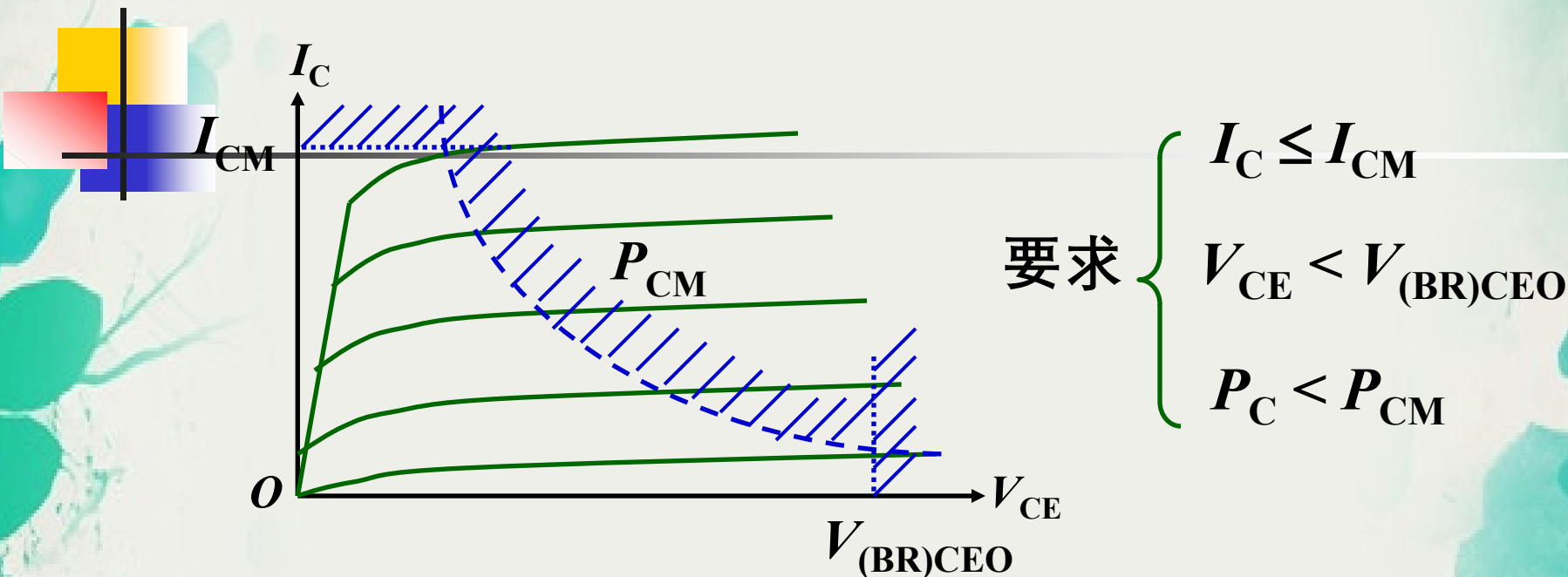
$I_B = 0$  时，击穿电压为  $V_{(BR)CEO}$

$I_E = 0$  时，击穿电压为  $V_{(BR)CBO}$

$$V_{(BR)CBO} > V_{(BR)CEO}$$



## 三极管安全工作区



- 最大允许集电极电流  $I_{CM}$  (若  $I_C > I_{CM} \rightarrow$  造成  $\beta \downarrow$ )
- 反向击穿电压  $V_{(BR)CEO}$  (若  $V_{CE} > V_{(BR)CEO} \rightarrow$  管子击穿)
- 最大允许集电极耗散功率  $P_{CM}$

( $P_C = I_C V_{CE}$ , 若  $P_C > P_{CM} \rightarrow$  烧管)

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/256223230033010051>