

# 第四章 半导体器件概述

## —— 4.2 双极型半导体三极管

李泳佳

东南大学电子系国家ASIC工程中心

yongjia.li@outlook.com





## 4.2 双极型半导体三极管

### 本节内容

4.2.1 三极管的结构及工作原理

4.2.2 三极管的基本特性

4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

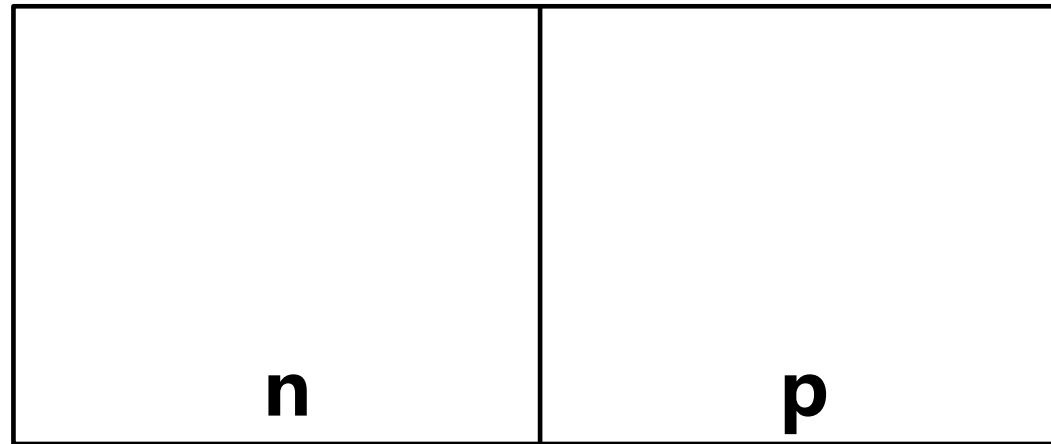
4.2.4 三极管的应用举例



## 4.2.0 PN结回顾

✓ 载流子与电流:

- 正偏
- 反偏





## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

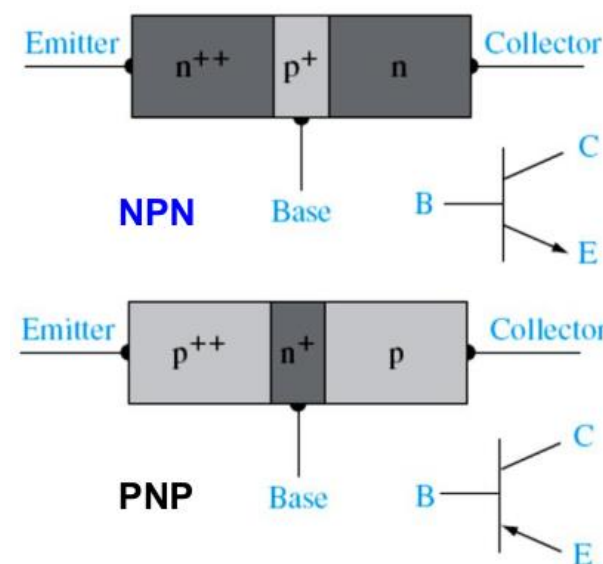
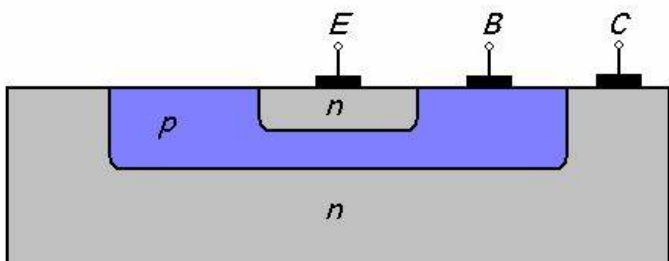
### ✓ 半导体晶体管：

- **双极型晶体管（三极管）**：Bipolar Junction Transistor (BJT)
  - 由两种载流子参与导电的半导体器件
  - Current controlled current source, CCCS器件
  - 1947年由William Shockley等发明，1956年诺贝尔奖
- **场效应晶体管（场效应管）**：Field-Effect Transistor (FET)
  - 由一种载流子参与导电的半导体器件
  - Voltage controlled current source, VCCS器件

## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

### ✓ 结构、符号和分类：

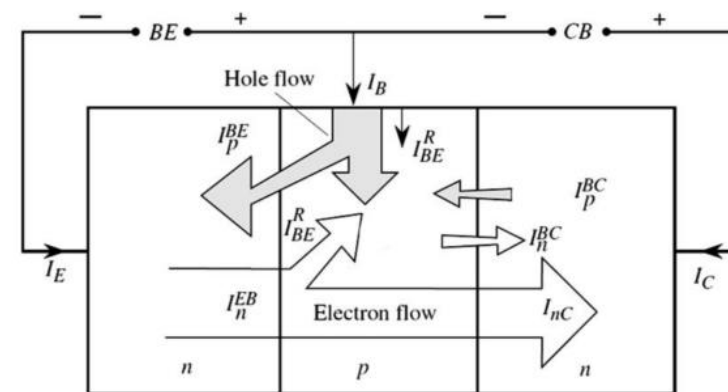
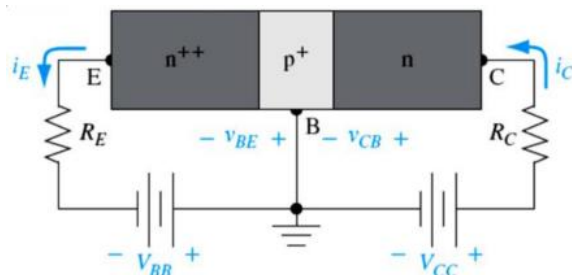
- **基本结构框图**：三个掺杂区域，形成两个背靠背的PN结，三个电极
- **发射极 (Emitter)**：重掺杂
- **基极 (Base)**：中度掺杂，薄
- **集电极 (Collector)**：轻掺杂，面积大



## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

### ✓ 载流子输运:

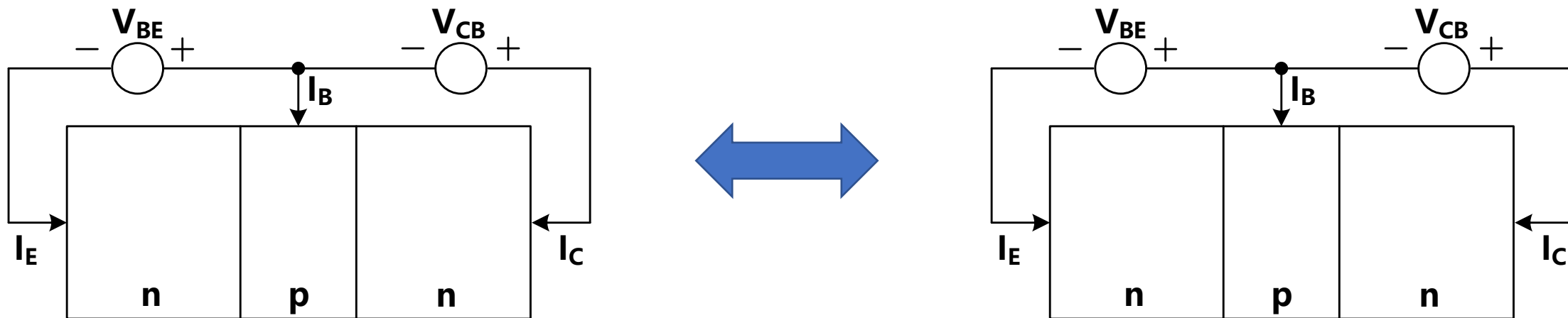
- **直流偏置电压**: 发射极正偏, 集电极反偏
- **BE正偏**: 发射极重掺杂, 电子扩散电流为主; 基极中等掺杂, 空穴扩散电流小
- **BC反偏**: 扩散受抑制, 漂移增强
- **基极窄**: BE的电子扩散到BC空间电荷区, 少量复合, 大量被BC电场拉入C



## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

### ✓ 载流子输运与电流关系:

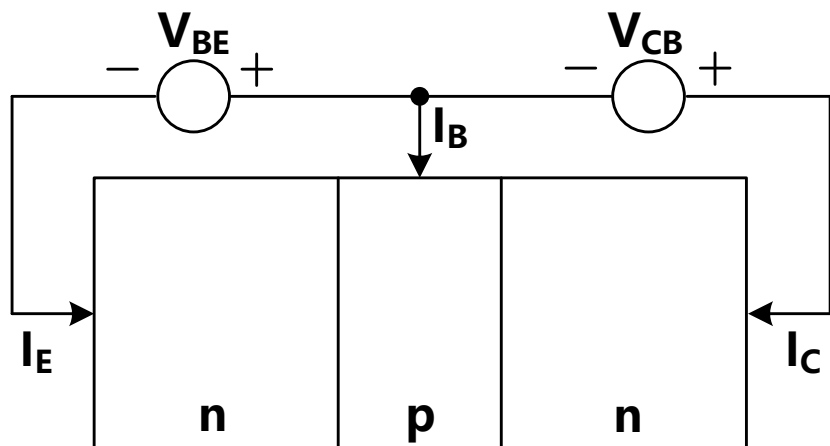
- **发射区**: 电子浓度高, 扩散到基区和集电区
- **基区**: 发射区电子部分与基区空穴复合, 形成 $I_{BE}$
- **集电区**: 扩散到基区的发射区电子被反向电场 $V_{BC}$ 拉入集电区, 形成 $I_{CE}$
- **BC区反偏**: 少子在反向电场作用下形成反向饱和电流 $I_{CBO}$



## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

### ✓ 载流子输运与电流关系:

- **发射区**: 电子浓度高, 扩散到基区和集电区
- **基区**: 发射区电子部分与基区空穴复合, 形成 $I_{BE}$
- **集电区**: 扩散到基区的发射区电子被反向电场 $V_{BC}$ 拉入集电区, 形成 $I_{CE}$
- **BC区反偏**: 少子在反向电场作用下形成反向饱和电流 $I_{CBO}$



$$\begin{aligned}
 I_E &= I_B + I_C \\
 I_B &= I_{BE} - I_{CBO} \\
 I_C &= I_{CE} + I_{CBO} \\
 \bar{\alpha} &= I_{CE}/I_E \\
 \bar{\beta} &= \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}
 \end{aligned}$$

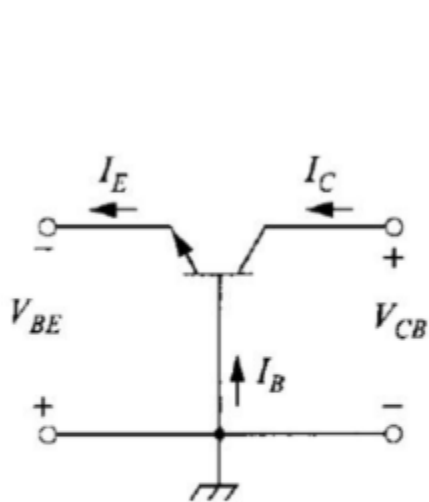
$$\begin{aligned}
 I_C &= \bar{\beta} I_B + I_{CEO} \\
 \bar{\alpha} &\approx I_C / I_E \\
 \bar{\beta} &\approx I_C / I_B
 \end{aligned}$$



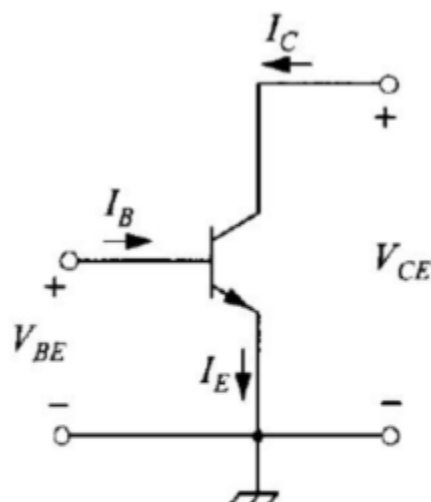
## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

### ✓ BJT放大电路的组态:

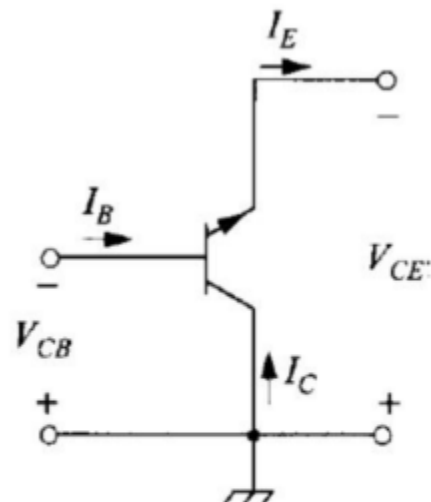
- 以输入输出信号的公共端命名：三端口器件，必然有一端共用



共基极  
common-base



共射极  
common-emitter

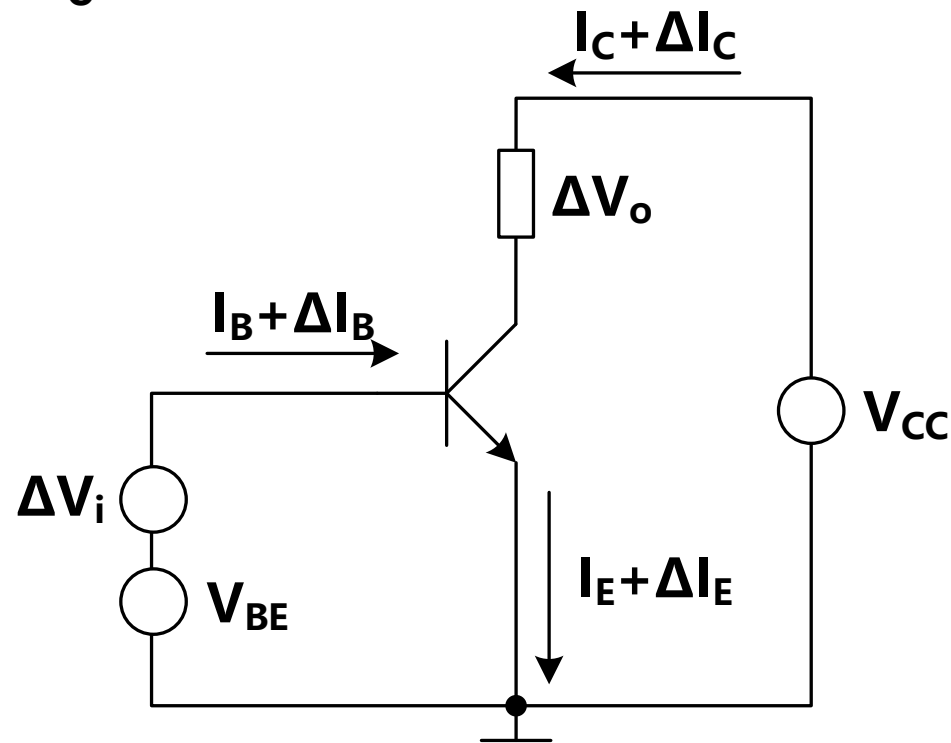


共集极  
common-collector

## 4.2.1 双极型三极管的结构和工作原理

✓ BJT共发射极放大电路：

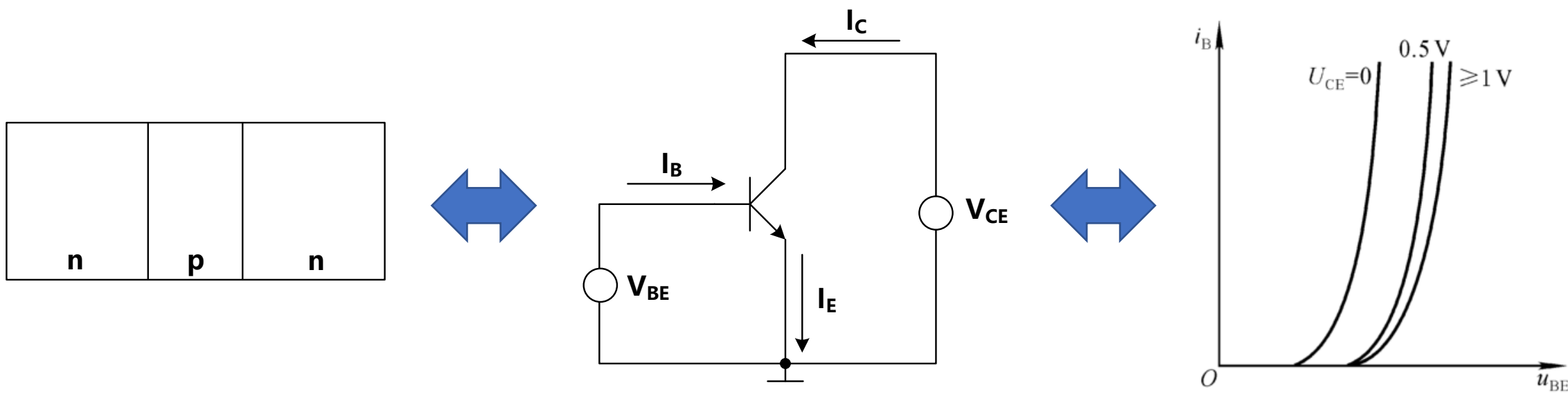
- 条件：  $R=1k$ ,  $V_{CC}=5V$ ,  $\beta=50$ ,  $I_B=20\mu A$
- 条件2：  $\Delta V_i$  到  $\Delta V_o$



## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 输入特性曲线:

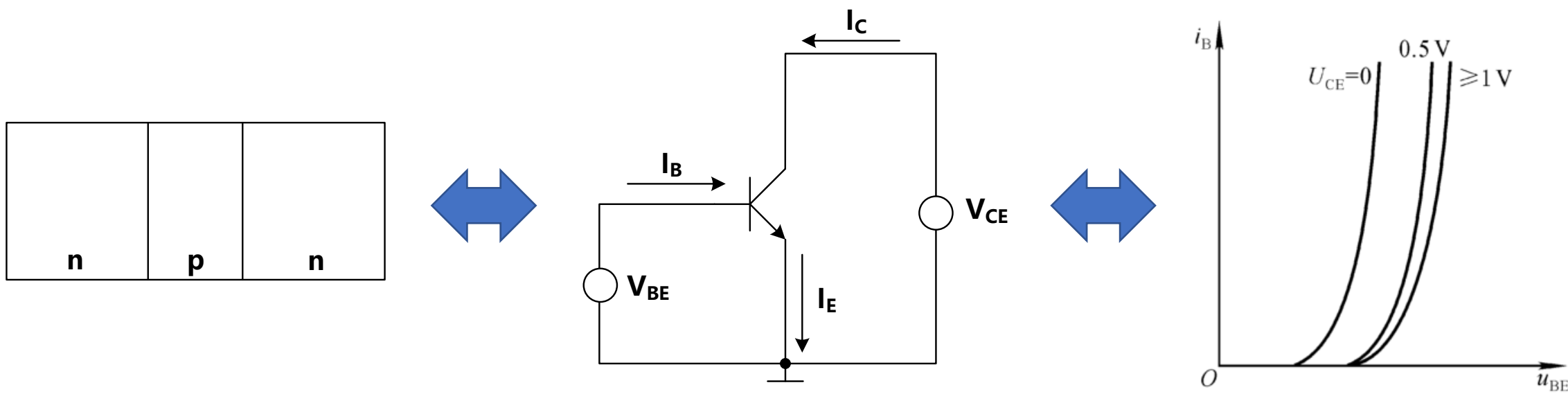
- 以共发射极为例:  $I_B = f(V_{BE})|_{V_{CE}=\text{const}}$
- $V_{CE}=0$ : 等效于两个PN结并联
- $V_{CE}>1V$ : 集电极反偏, 处于放大状态



## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 输入特性曲线:

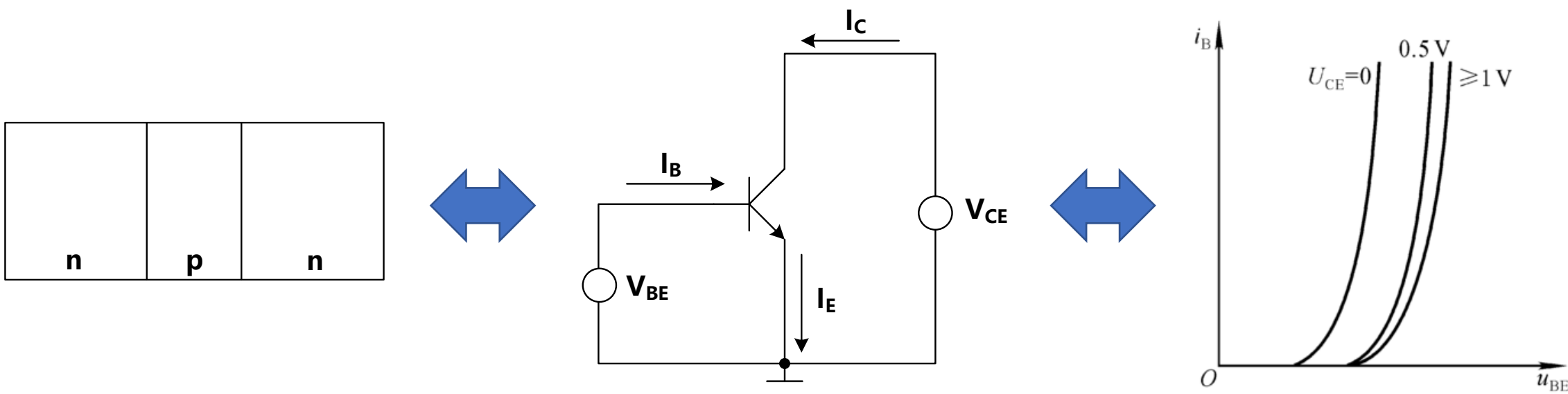
- 以共发射极为例:  $I_B = f(V_{BE})|_{V_{CE}=\text{const}}$
- $V_{BE} > V_{TH}$ ,  $V_{CE} = 0$ : 等效于两个PN结并联
- $V_{BE} > V_{TH}$ ,  $V_{CE} > V_{BE} - V_{TH}$ : 集电极反偏, 再增加 $V_{CE}$ 右移不明显



## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 输入特性曲线:

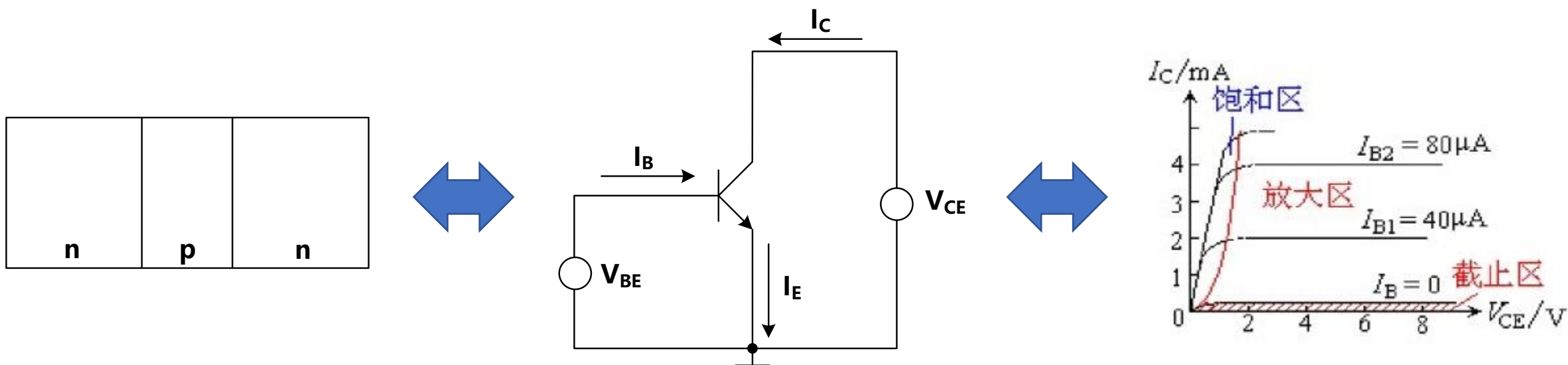
- 以共发射极为例:  $I_B = f(V_{BE})|_{V_{CE}=\text{const}}$
- $V_{BE} > V_{TH}$ ,  $V_{CE} > V_{BE} - V_{TH}$ : 集电极反偏, 再增加  $V_{CE}$  右移不明显
- 基区宽度调制效应: 基区宽度变窄导致复合减弱



## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 输出特性曲线:

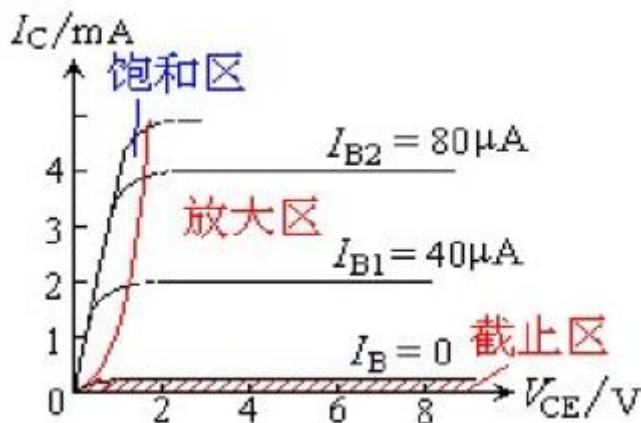
- 以共发射极为例:  $I_C = f(V_{CE})|_{I_{BE}=\text{const}}$
- $V_{CE} > V_{BE} - V_{TH}$ :  $I_C$  几乎恒流
- 增加  $I_B$ : 进一步增加  $I_C$



## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 输出特性曲线:

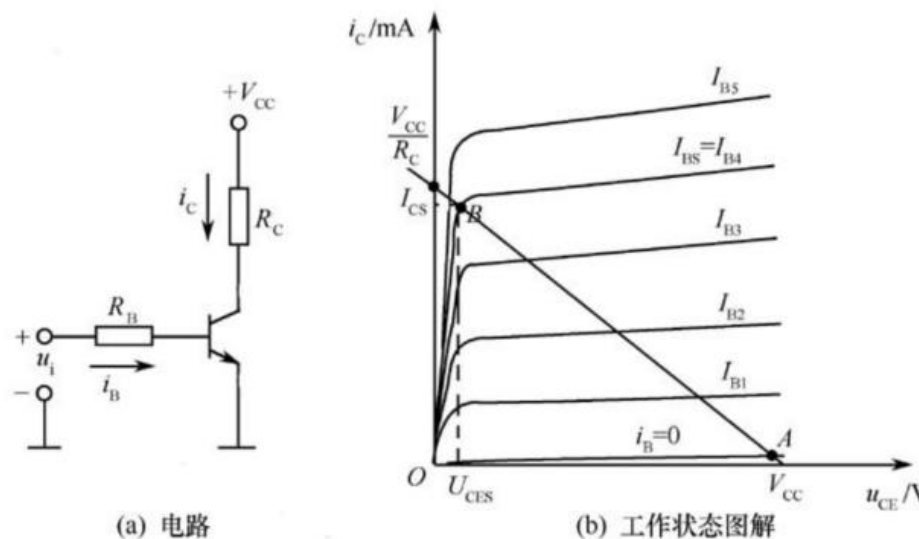
- 截止区: BE零偏/反偏或 $V_{BE} < V_{TH}$
- 饱和区: BE正偏, CE零偏或正偏,  $V_{BE} > V_{TH}$ ,  $V_{CE} < V_{BE} - V_{TH}$
- 放大区: BE正偏, CE反偏,  $V_{BE} > V_{TH}$ ,  $V_{CE} > V_{BE} - V_{TH}$



## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 开关特性:

- 截止状态:  $I_B=0$ ,  $I_C=0$ ,  $V_{CE}=V_{CC}$
- 饱和状态:  $I_B=I_{BS}$ ,  $I_C=I_{CS}$ ,  $V_{CE}=V_{CES}$
- 饱和压降 $V_{CES}$ :  $I_C$ 饱和时的管压降
- 基极饱和电流 $I_{BS}$ :  $I_B > I_{BS}$



$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - U_{CES}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$$

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC}}{\beta \cdot R_C}$$

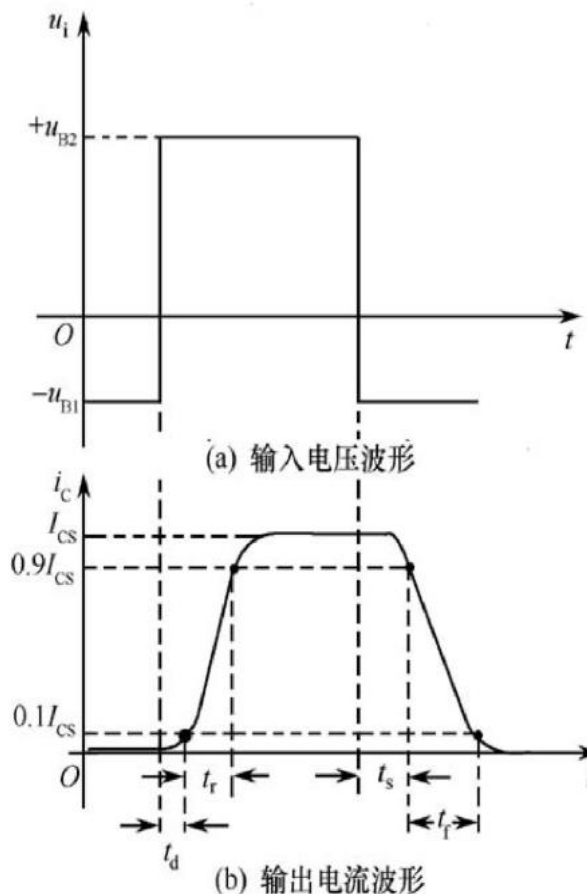
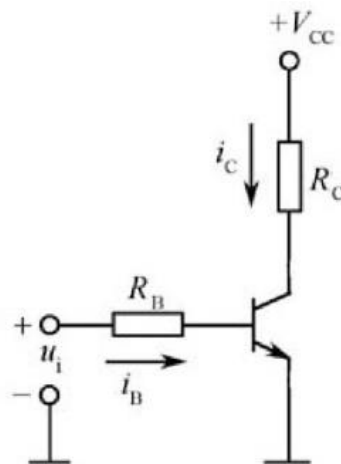


## 4.2.2 三极管的基本特性

### ✓ 开关时间:

- 延迟时间 $t_d$ :  $+U_{B2}$  加入  $\rightarrow 0.1I_{CS}$
- 上升时间 $t_r$ :  $0.1I_{CS} \rightarrow 0.9I_{CS}$
- 存储时间 $t_s$ :  $-U_{B1}$  加入  $\rightarrow 0.9I_{CS}$
- 下降时间 $t_f$ :  $0.9I_{CS} \rightarrow 0.1I_{CS}$
- 开通时间:  $t_{on}=t_d+t_r$
- 关闭时间:  $t_{off}=t_s+t_f$

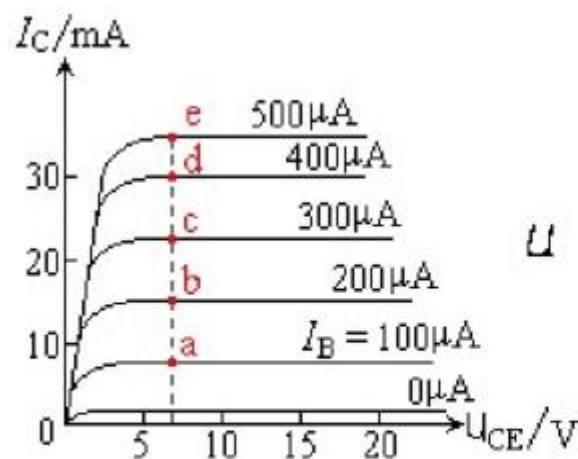
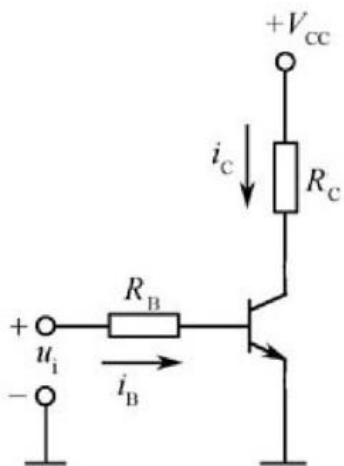
### ✓ 开通时间和关闭时间总称为**开关时间**



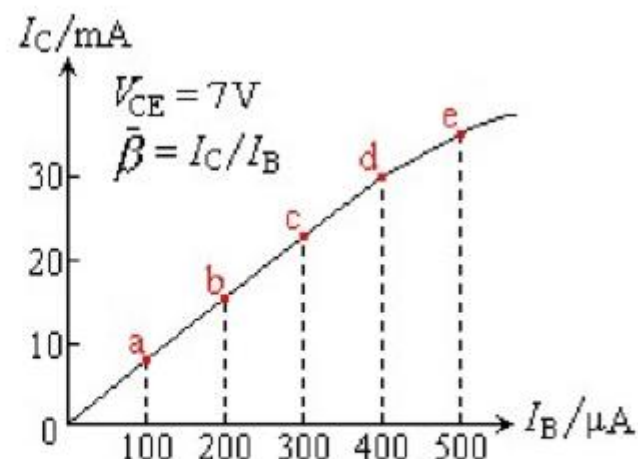
## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ 主要参数：直流参数，交流参数，极限参数

- 直流参数：共发射极直流电流放大系数 $\bar{\beta}$ ， $\bar{\beta} = (I_C - I_{CE0})/I_B$



在输出特性曲线上决定  $\bar{\beta}$

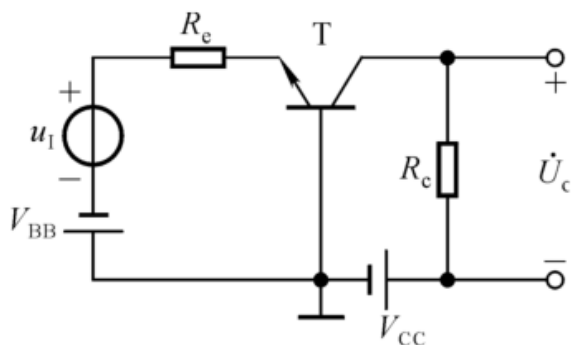


$\bar{\beta}$  值与  $I_C$  的关系

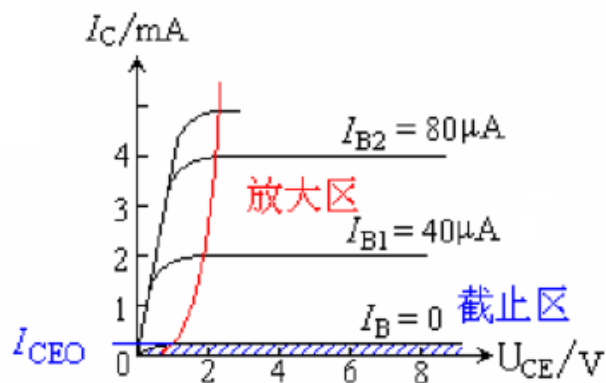
## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ 主要参数：直流参数，交流参数，极限参数

- 直流参数：共基极直流电流放大系数 $\bar{\alpha}$ ， $\bar{\alpha} = (I_C - I_{CBO})/I_E$



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



✓ 反向饱和电流 $I_{CBO}$ ：发射极开路

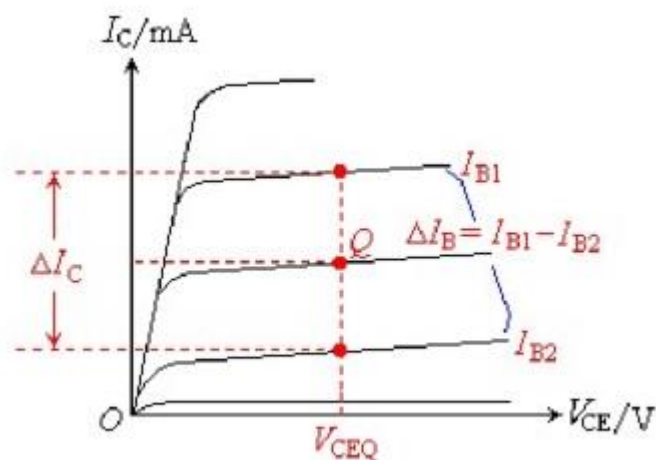
✓ 穿透电流 $I_{CEO}$ ：基极开路

## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ **主要参数：** 直流参数，交流参数，极限参数

- **交流参数：** 共发射极交流电流放大系数 $\beta$

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \big|_{u_{CE} = \text{const}}$$



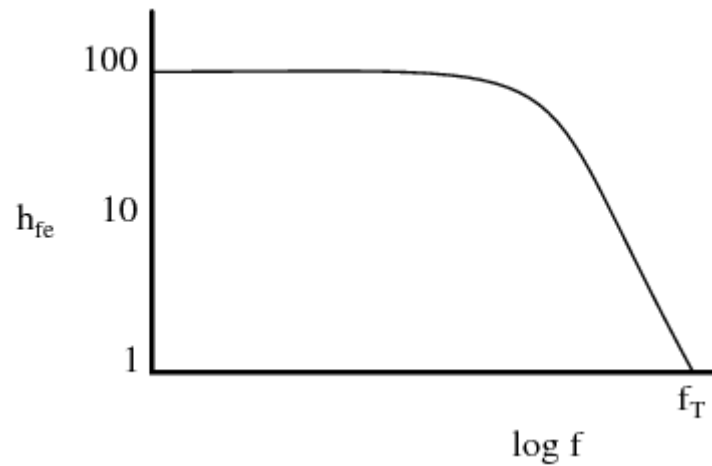
✓ 输出特性曲线上，通过垂直于X轴的直线求取

## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ **主要参数：**直流参数，**交流参数**，极限参数

- **交流参数：**特征频率 $f_T$

- 由于结电容的影响，当信号频率增加时，三极管的 $\beta$ 将会下降。  
当 $\beta$ 下降到1时所对应的频率称为特征频率，用 $f_T$ 表示。

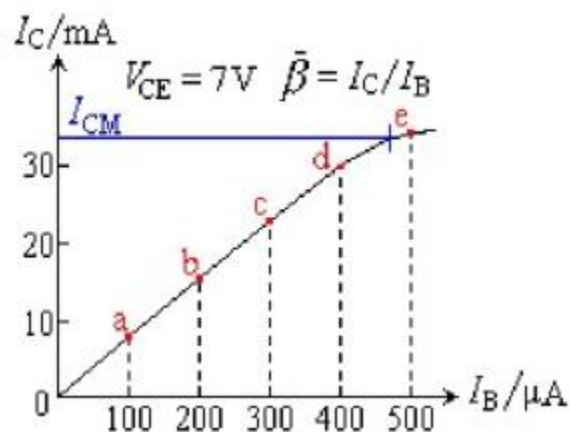


## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ **主要参数：**直流参数，交流参数，**极限参数**

- **极限参数：集电极最大允许电流 $I_{CM}$**

- 当集电极电流增加时， $\beta$ 就要下降，当 $\beta$ 值下降到线性放大区 $\beta$ 值的2/3时，所对应的集电极电流称为集电极最大允许电流 $I_{CM}$
- 并不代表会损坏





## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ **主要参数：**直流参数，交流参数，**极限参数**

- **极限参数：集电极最大允许功率损耗 $P_{CM}$**

- 集电极电流通过集电结时所产生的功耗， $P_{CM} = I_C U_{CB} \approx I_C U_{CE}$

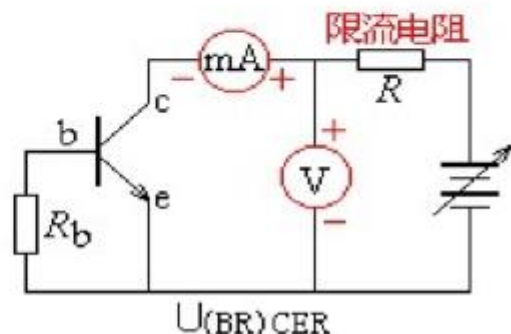
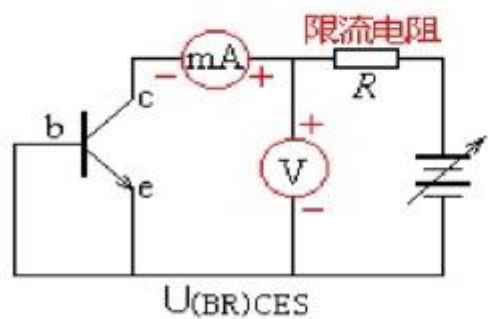
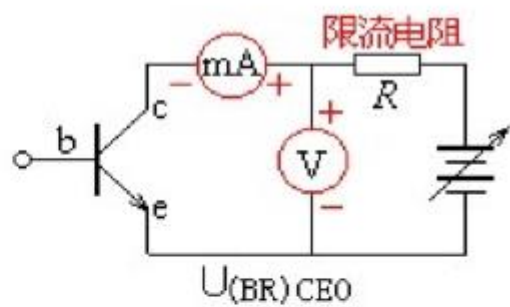
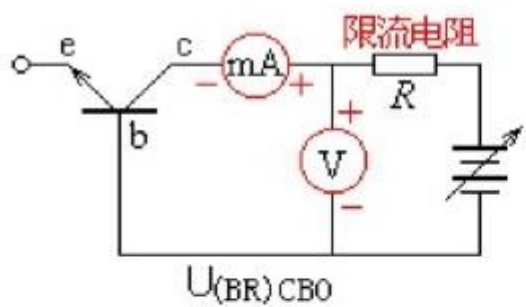
- 因发射结正偏，呈低阻，所以功耗主要集中在集电结上。在计算时往往用 $U_{CE}$ 取代 $U_{CB}$

## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ **主要参数：** 直流参数，交流参数，**极限参数**

- **极限参数：反向击穿电压**

- 反向击穿电压表示三极管电极间承受反向电压的能力



✓  $U_{(BR)CBO}$ ：发射极开路时集电极击穿电压

✓  $U_{(BR)CEO}$ ：基极开路时C和E间的击穿电压

✓  $U_{(BR)CER}$ ：BE间连接有电阻

✓  $U_{(BR)CES}$ ：BE间短路

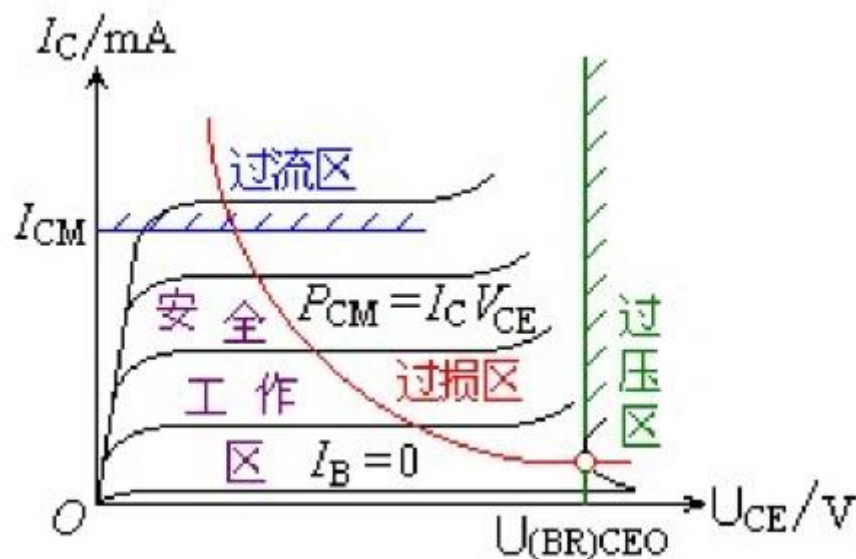
✓  $U_{(BR)CBO} > U_{(BR)CES} > U_{(BR)CER} > U_{(BR)CEO}$



## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

### ✓ 安全工作区:

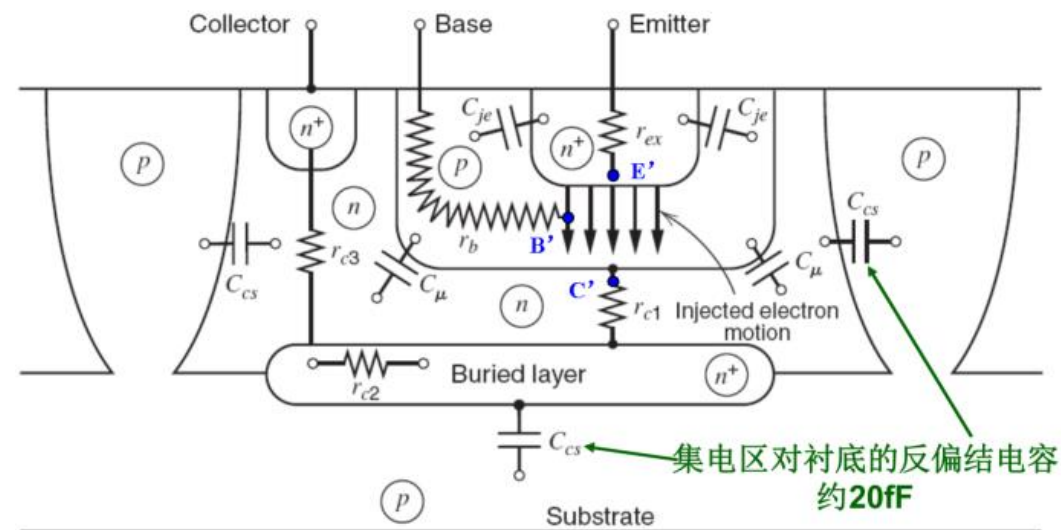
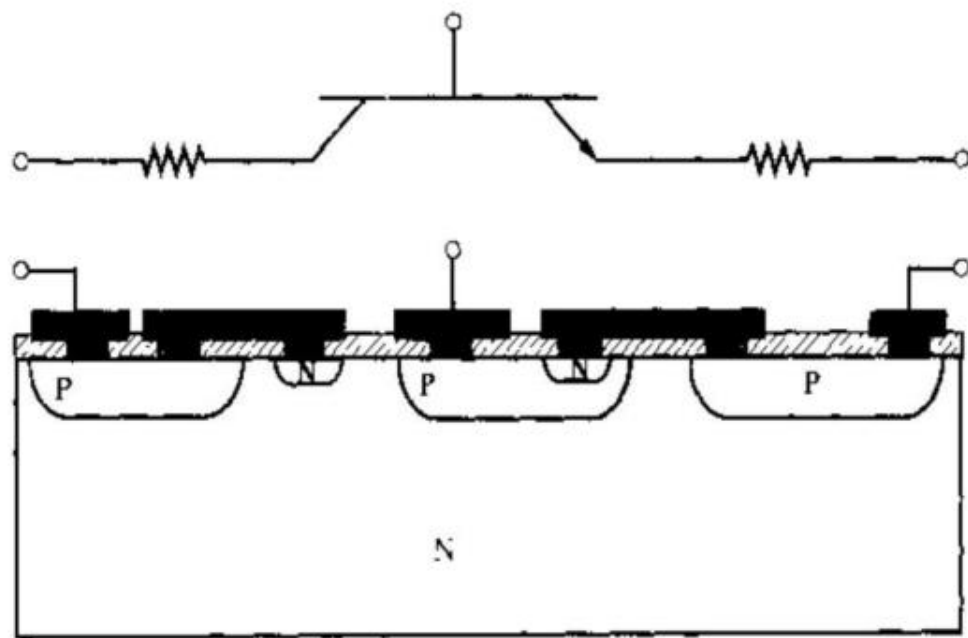
- 由 $P_{CM}$ 、 $I_{CM}$ 和 $U_{(BR)CEO}$ 在输出特性曲线上可确定过损耗区、过电流区和击穿区。





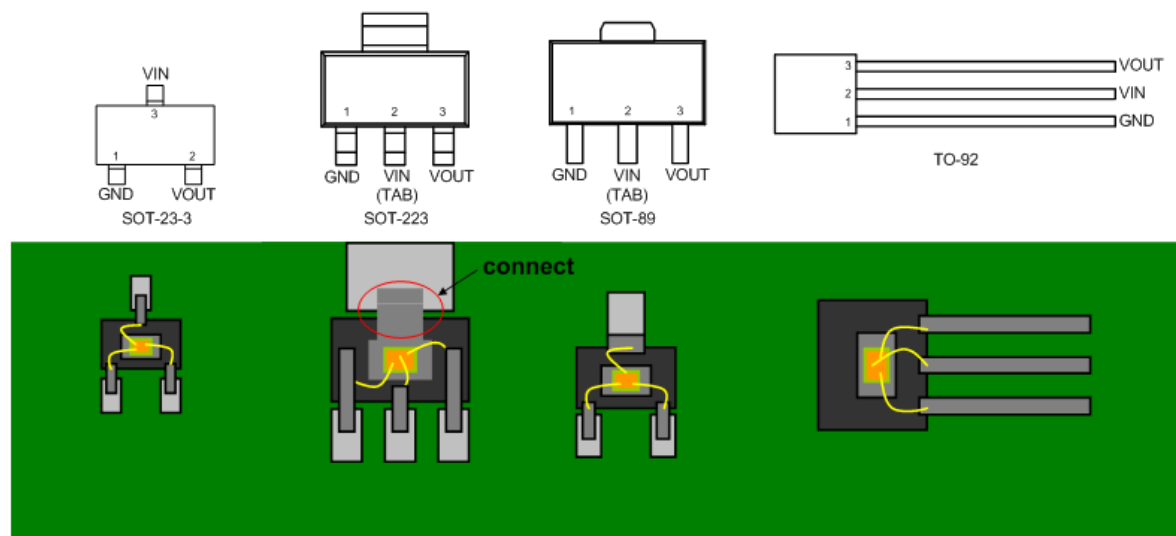
## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

### ✓ NPN型三极管:



## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

✓ 封装:



## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

### ✓ 电路模型：

#### - 物理结构

$r_{bb'}$  --基区的体电阻， $b'$ 是假想基区内的一个点。

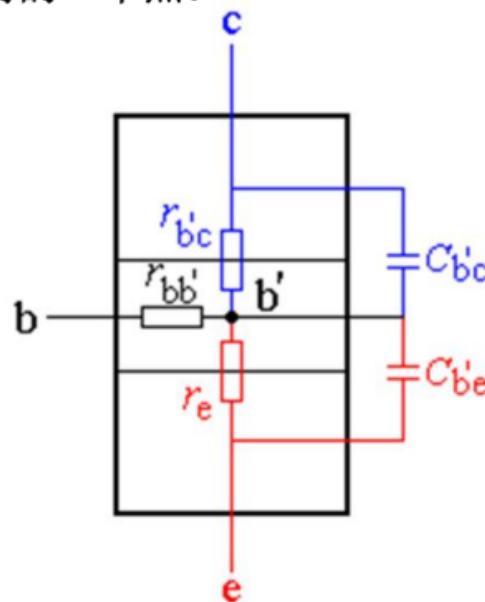
$r_e$  -- 发射结电阻

$r_{b'e}$  --  $r_e$ 归算到基极回路的电阻

$r_{b'c}$  -- 集电结电阻

$C_{b'e}$  -- 发射结电容，也用  $C_\pi$  这一符号

$C_{b'c}$  -- 集电结电容，也用  $C_\mu$  这一符号



# 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

## ✓ 电路模型:

- 直流/简化交流等效电路模型

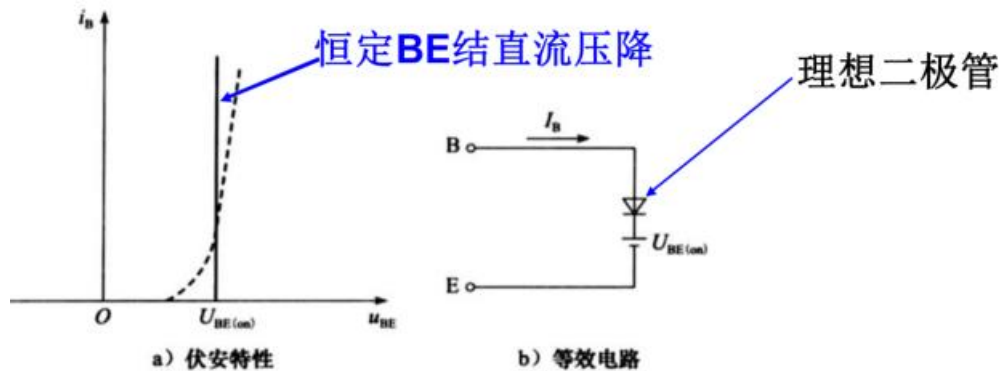
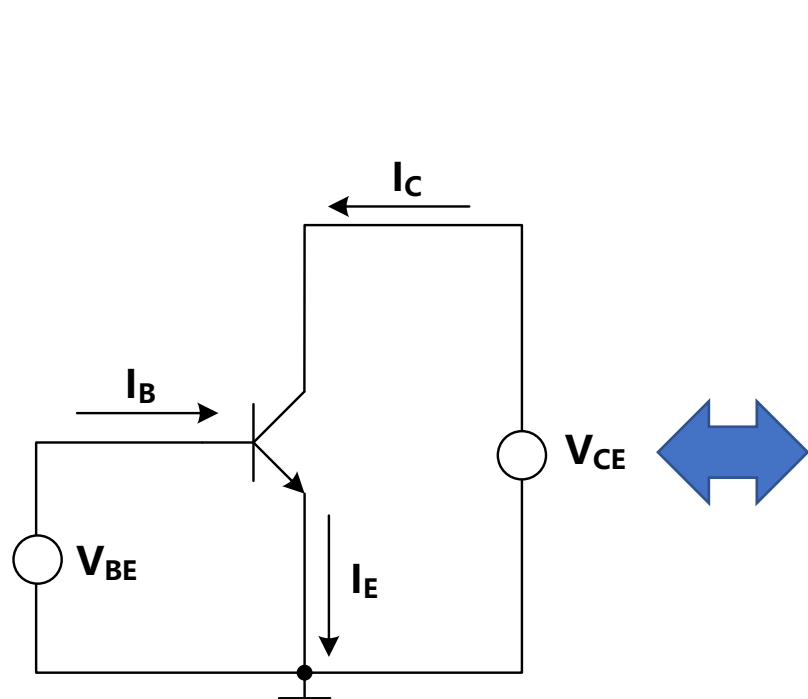
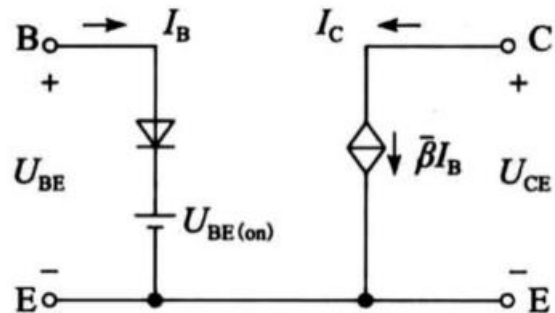


图 4.2.12 三极管 B-E 间的等效电路

	$U_{BE(on)}$
Si管	0.6~0.7V
Ge管	0.1~0.3V



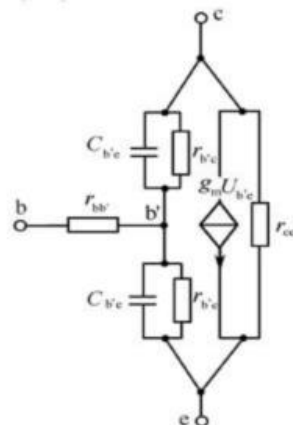
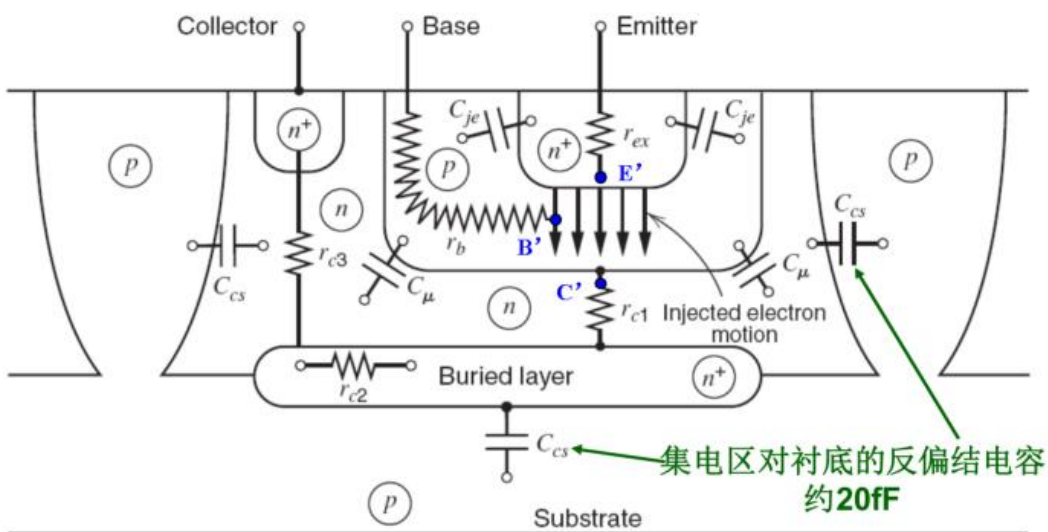
## ✓ 跨导定义:

$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}}$$

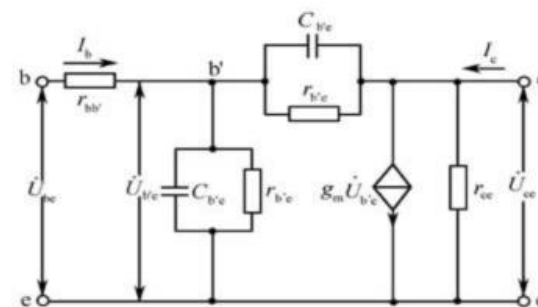
# 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

## ✓ 电路模型:

- 混合 $\pi$ 型微变等效电路



(a) 三极管的物理模拟电路

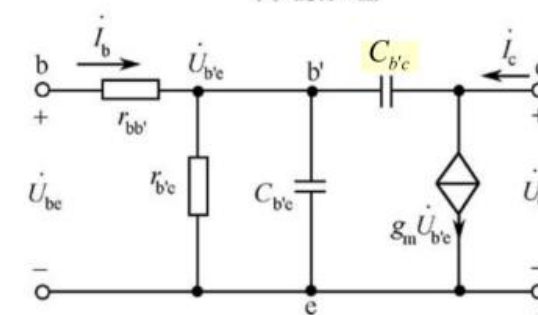


(b) 混合 $\pi$ 型

简化:

忽略 $r_{b'c}$ 、 $r_{ce}$

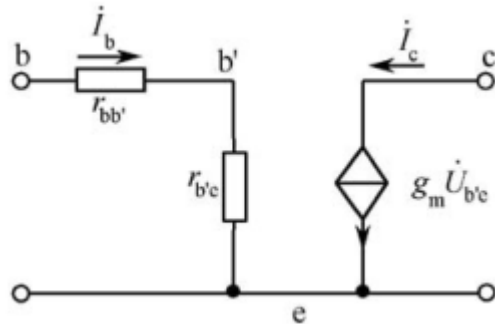
忽略 $C_{b'c}$ 、 $C_{b'e}$



## 4.2.3 三极管的主要参数及电路模型

### ✓ 电路模型:

- 混合 $\pi$ 型微变等效电路进一步简化



$$i_c = g_m u_{b'e} = \beta i_b$$

$$u_{b'e} = i_b r_{b'e}$$

$$\beta = g_m r_{b'e}$$

$$\text{其中 } r_{b'e} = (1 + \beta) \frac{v_T}{I_E}$$