

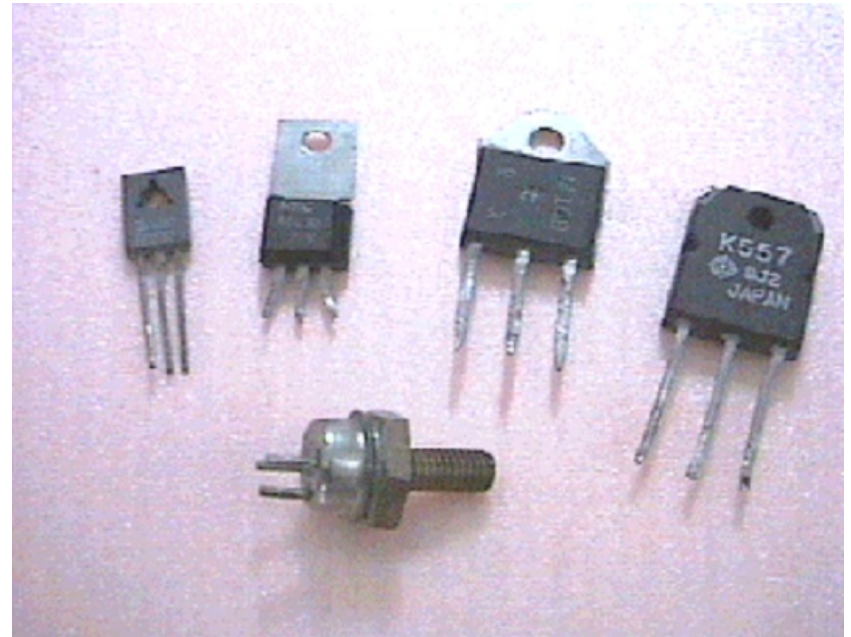
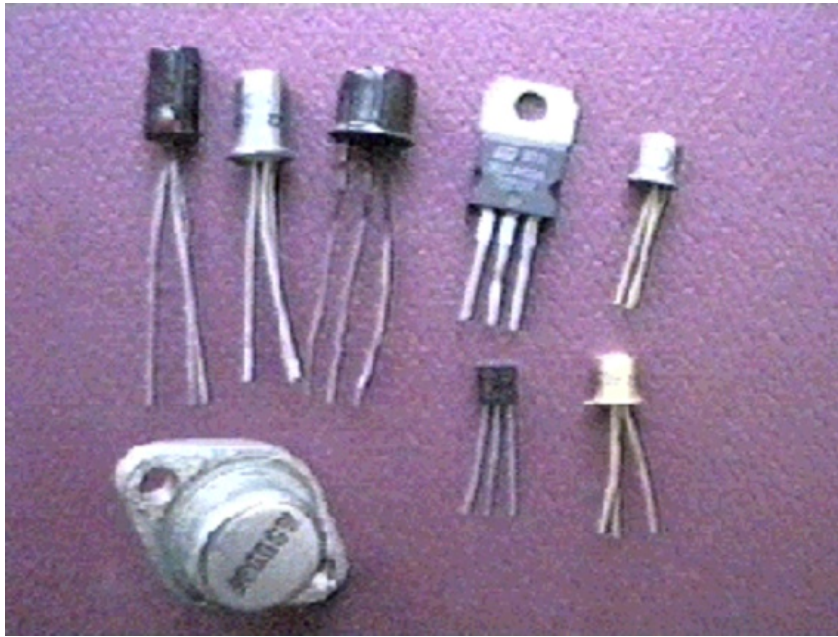
# 5-3 双极型晶体三极管

---

## 主要内容：

1. 三极管工作原理
2. 三极管的特性曲线
3. 三极管基本参数
4. 三极管分类
5. 三极管的低频小信号电路模型

双极型晶体管简称晶体管或三极管，是对信号具有放大作用的三端半导体器件，广泛应用与各种电子电路中。



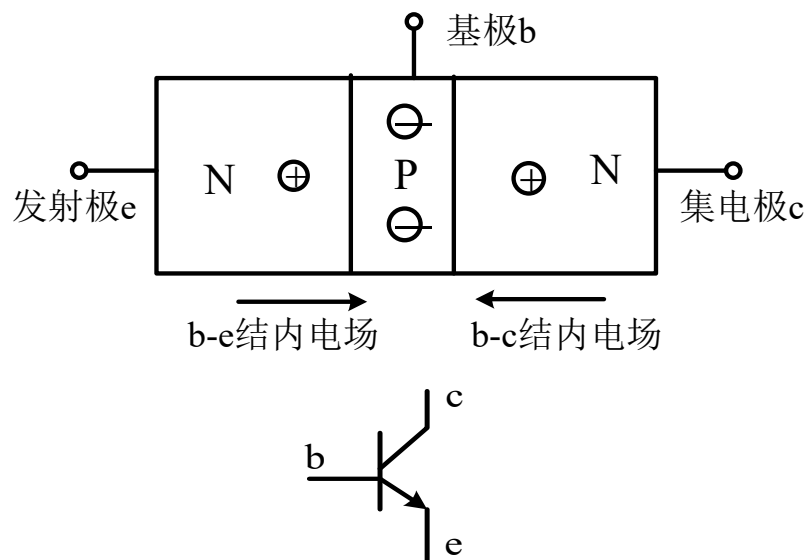
# 5-3-1 三极管的工作原理

三极管是由两个背靠背的**PN结**组成，有三个电极：基极**b**、集电极**c**和发射极**e**  
三极管是通过两种载流子（空穴和电子）导电的，所以叫双极型晶体三极管

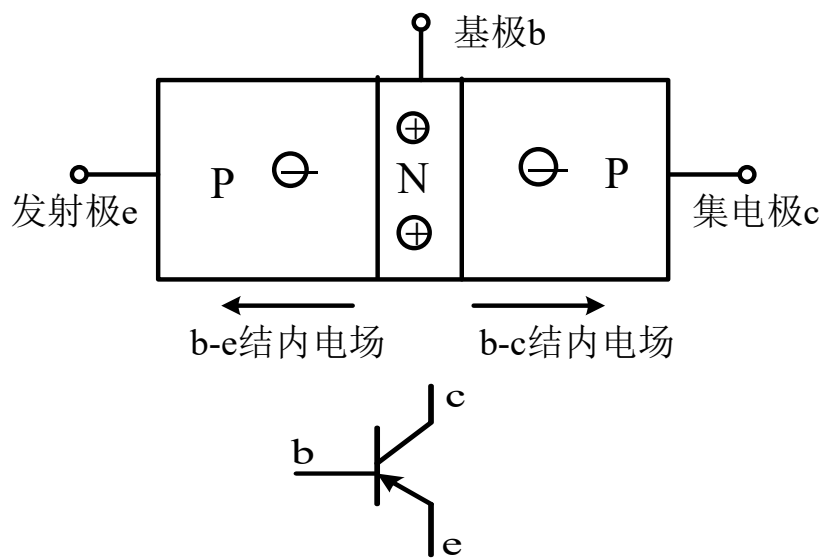
**三极管的主要类型** (1) 根据结构分为: **NPN型和PNP型**

(2) 根据使用的半导体材料分为: **硅管和锗管**

**硅管多为NPN型晶体管，NPN型晶体管最常用**

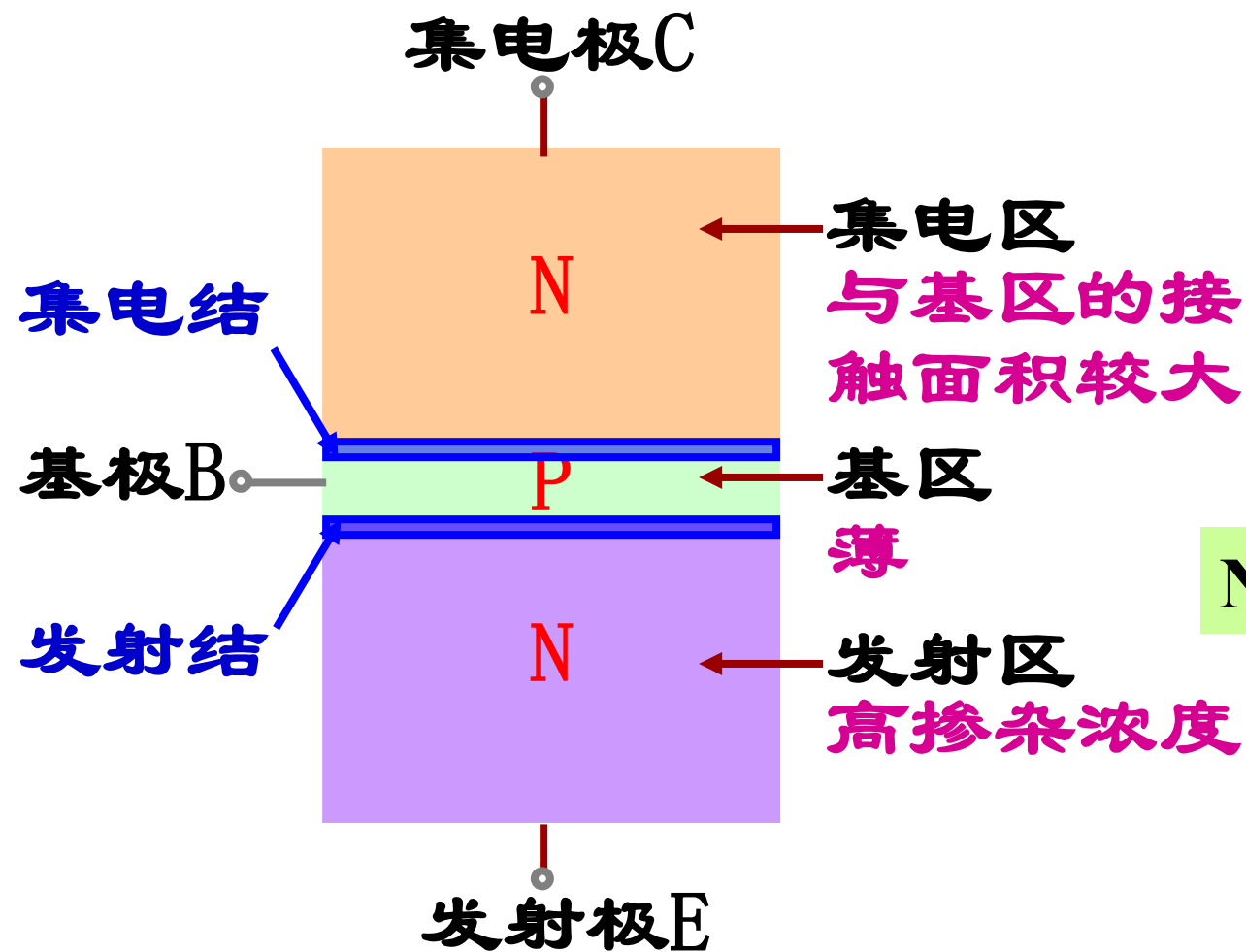


NPN型三极管结构示意图与电路符号

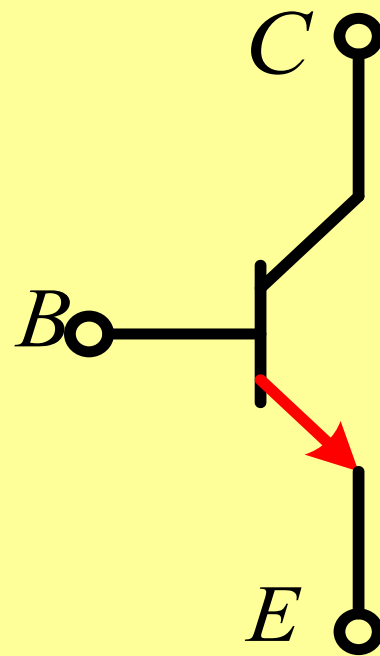


PNP型三极管结构示意图与电路符号

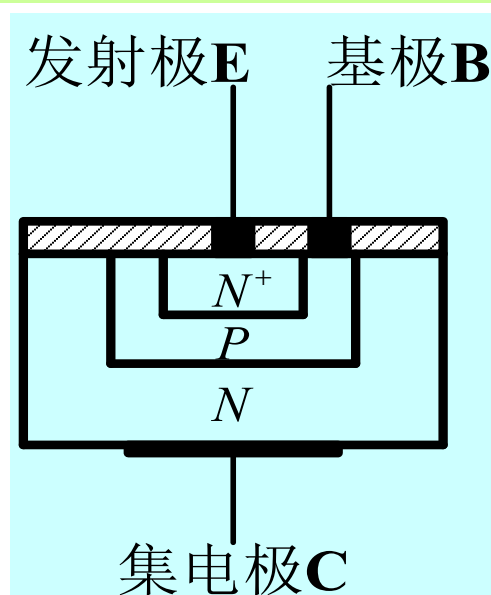
# 一. 结构特点



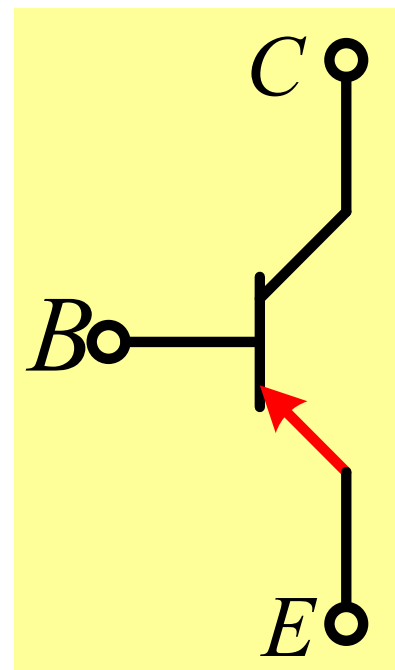
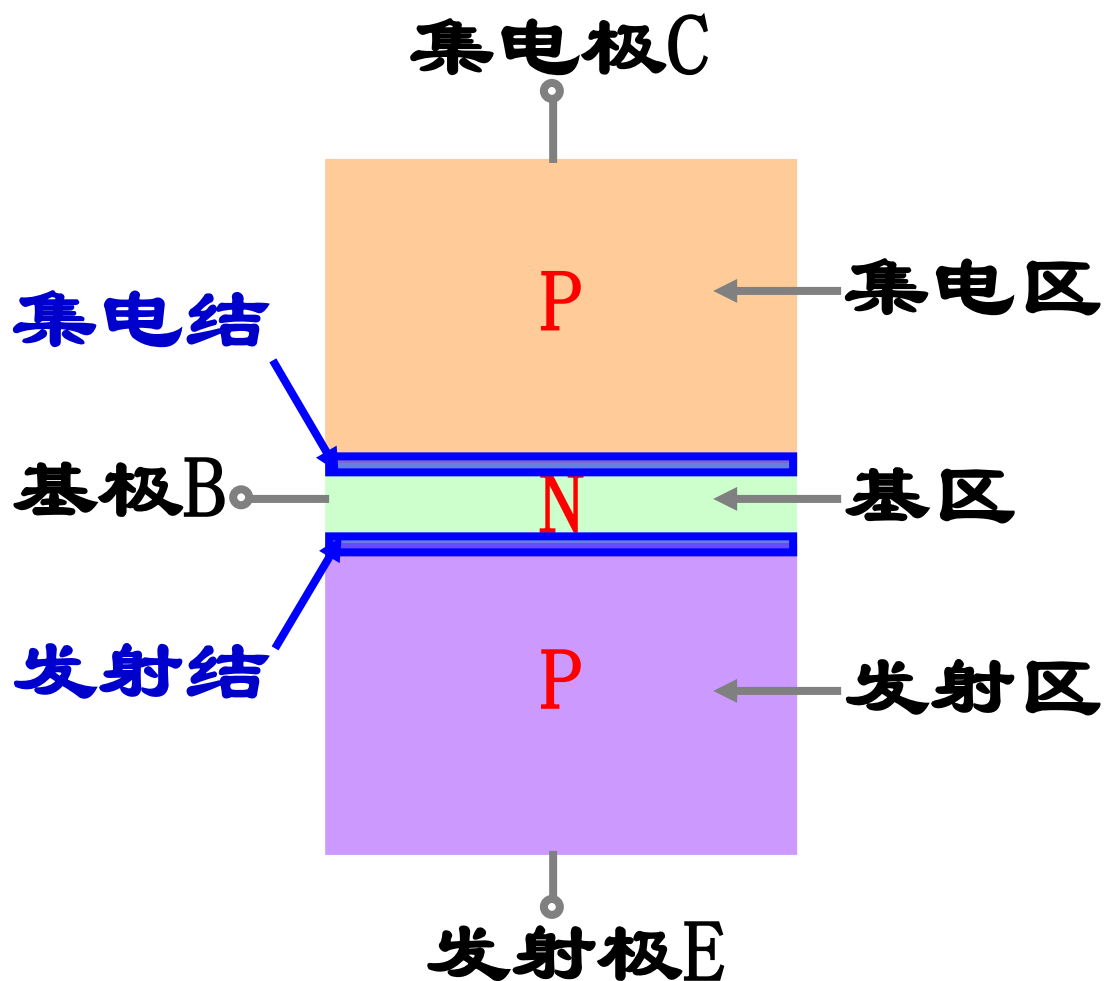
NPN型三极管的结构



NPN管的电路符号



# 一. 结构特点



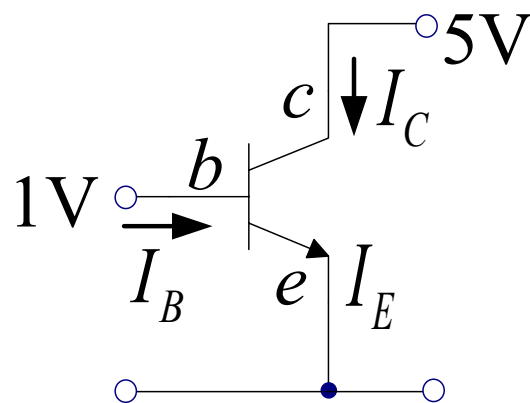
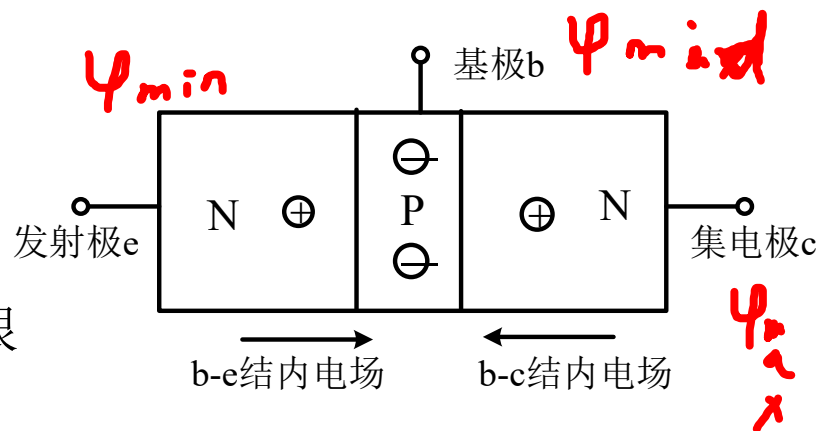
PNP管的电路符号

PNP型三极管的结构

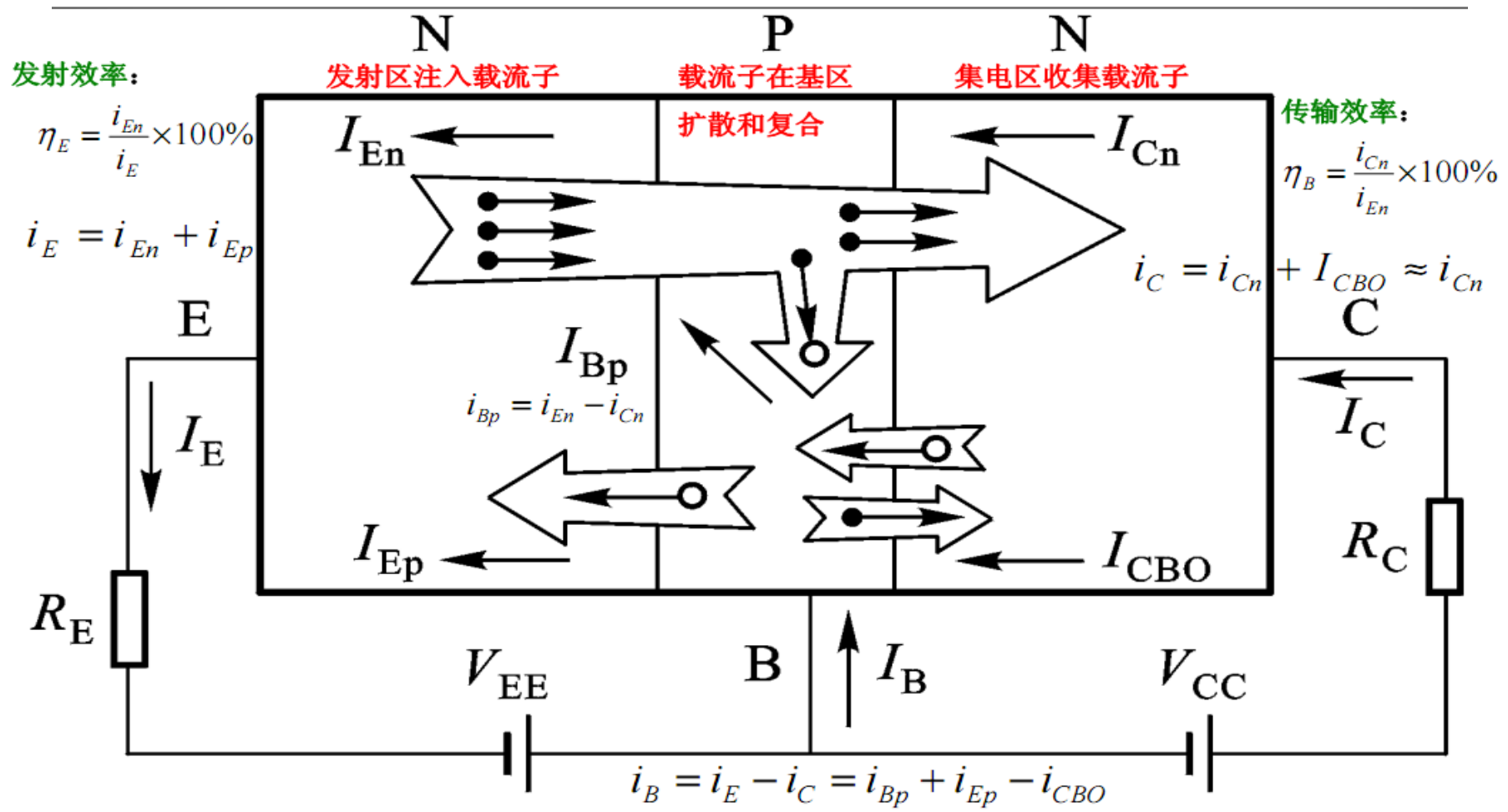
# 5-3-1 三极管的工作原理

以NPN型三极管为例

- 对b-e结施加正向偏置电压，b-e结导通，产生由e向b的电子流。发射区不断从电源得到电子，形成发射极电流  $I_E$ 。
- 对c-b结设置成反向偏置，集电极就具有很强的电子吸收能力。
- 由于基区很薄，由发射区到达基区的电子小部分被基极空穴复合，电源向基区提供空穴，形成基极电流  $I_B$ 。
- 大部分电子会在集电极电场吸引下跃过基区进入集电极  $I_C$ 。由于所收集的电子数大于进入基极的电子数，因此集电极电流大于基极电流。
- 在一定范围内，集电极电流与基极电流保持了比较固定的比例关系，即三极管的基极电流控制了集电极电流。



# 二. 晶体管的四种工作状态（放大状态的讨论）



三极管内有两种载流子(自由电子和空穴)参与导电，故称为双极型三极管。或BJT (Bipolar Junction Transistor)。

# 5-3-2 双极性晶体管的特性曲线

## 2、输入特性曲线

以共射极连接方式组成的放大电路为例

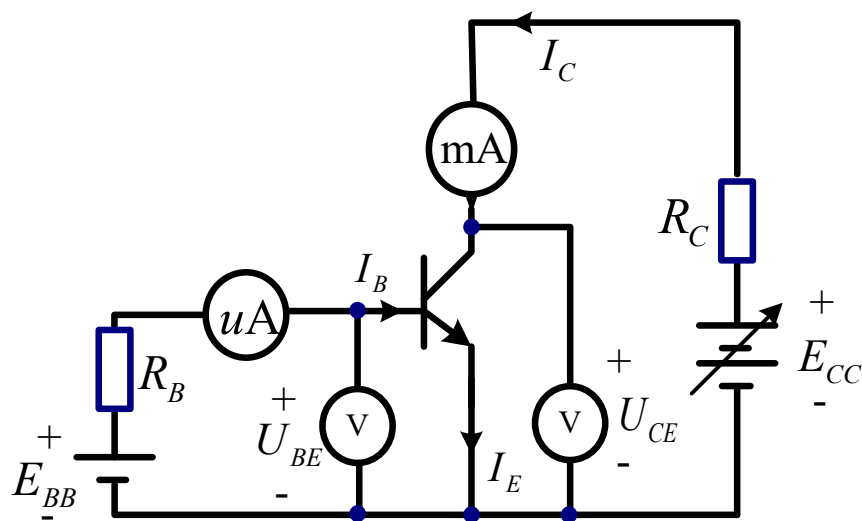


图 5-3-5 三极管共射极放大测试电路

$$I_B = f(U_{BE}) \mid U_{CE} = \text{常数}$$

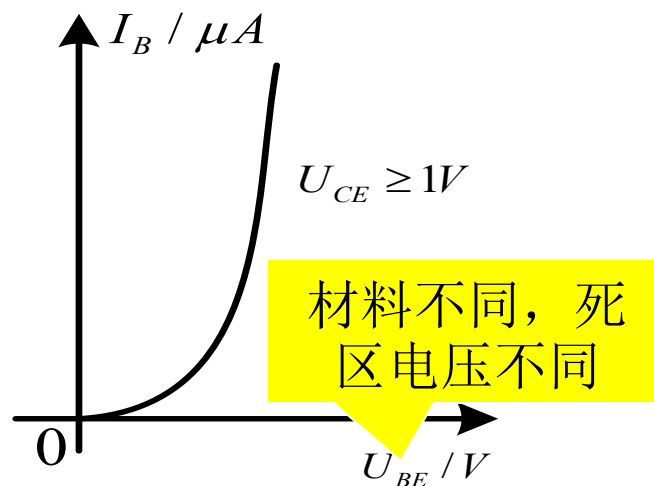
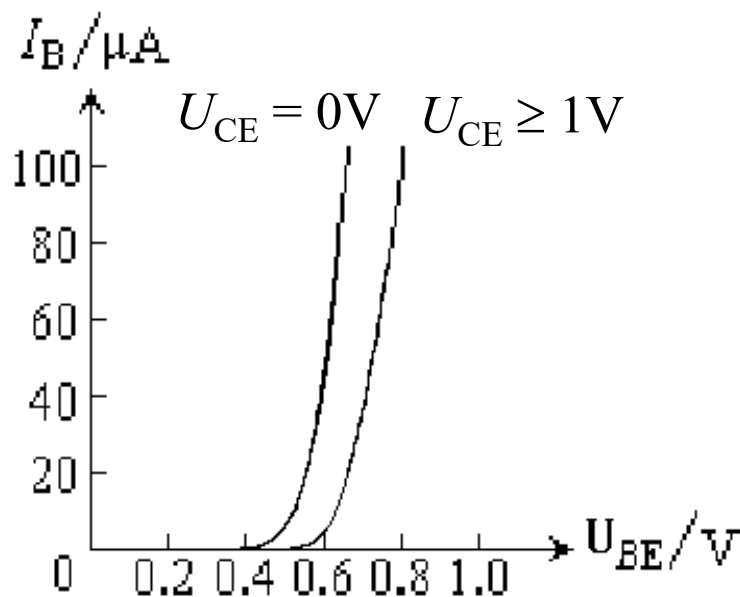


图 5-3-6 三极管输入特性曲线



(1) 当  $U_{CE}=0V$  时，发射极与集电极短路，相当于并联的两个二极管正向特性曲线。

(2) 当  $U_{CE} \geq 1V$  时， $U_{CB}=U_{CE}-U_{BE} > 0$ ，集电结已进入反偏状态，开始收集电子，基区复合减少，同样的  $U_{BE}$  下  $I_B$  减小，特性曲线右移。



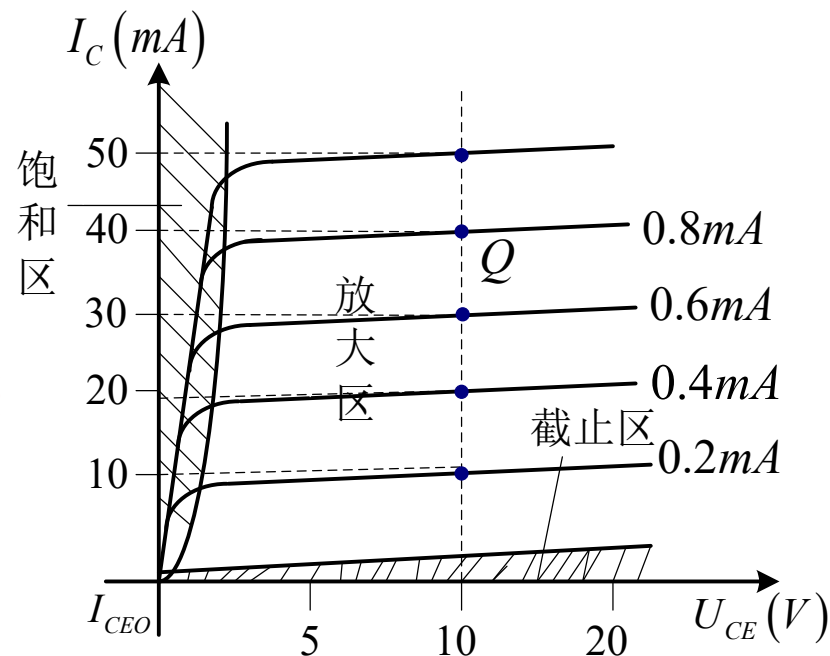
# 5-3-2 双极性晶体管的特性曲线

## 3、输出特性曲线

$$I_C = g(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$$

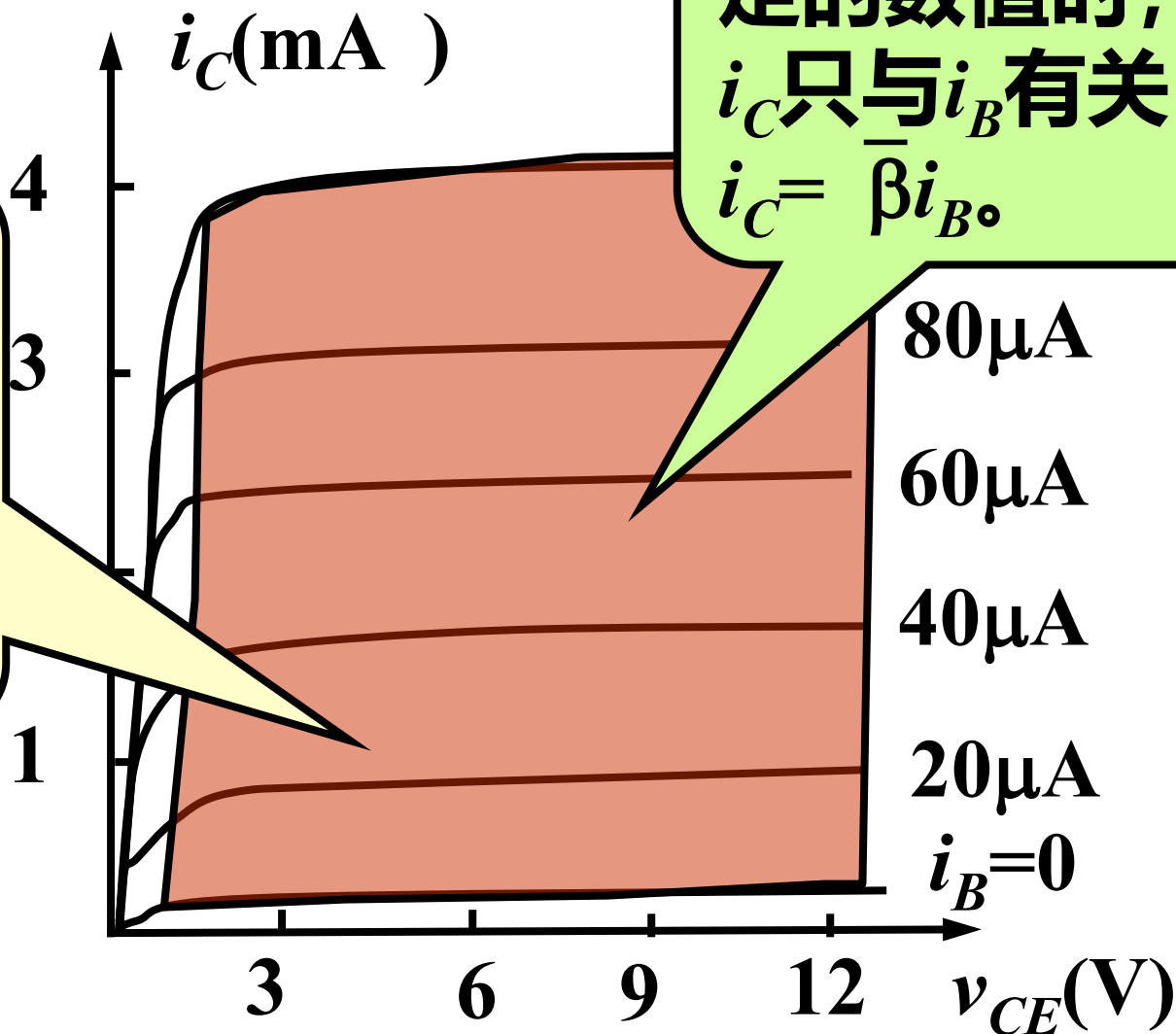
输出特性曲线的三个区域:

放大区:  $i_C$  平行于  $U_{CE}$  轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, 发射结正偏, 集电结反偏。



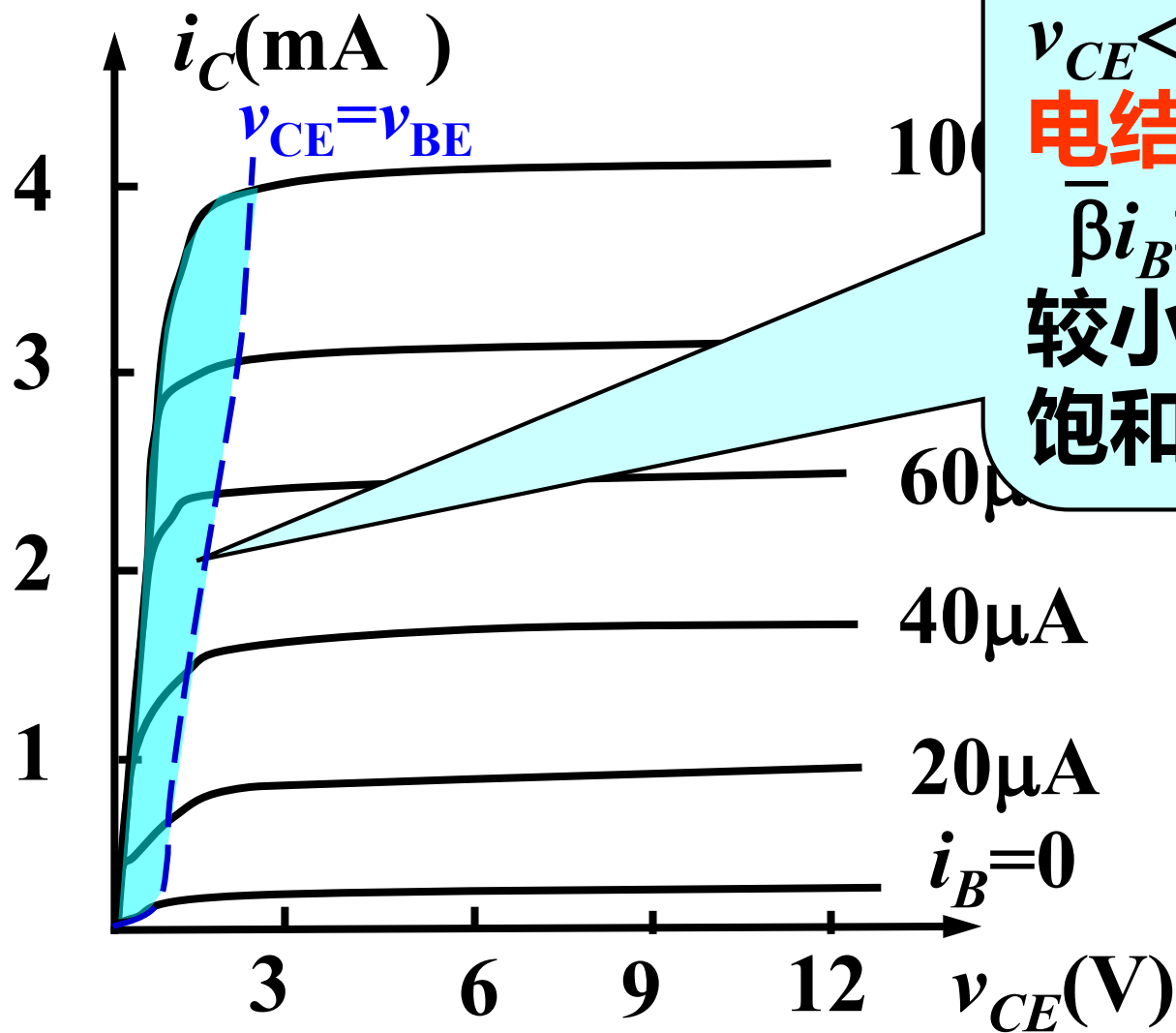
## 二. 共射输出特性曲线

此区域满足  $i_C = \bar{\beta} i_B$  称为线性区（放大区）。



输出特性

## 二. 共射输出特性曲线

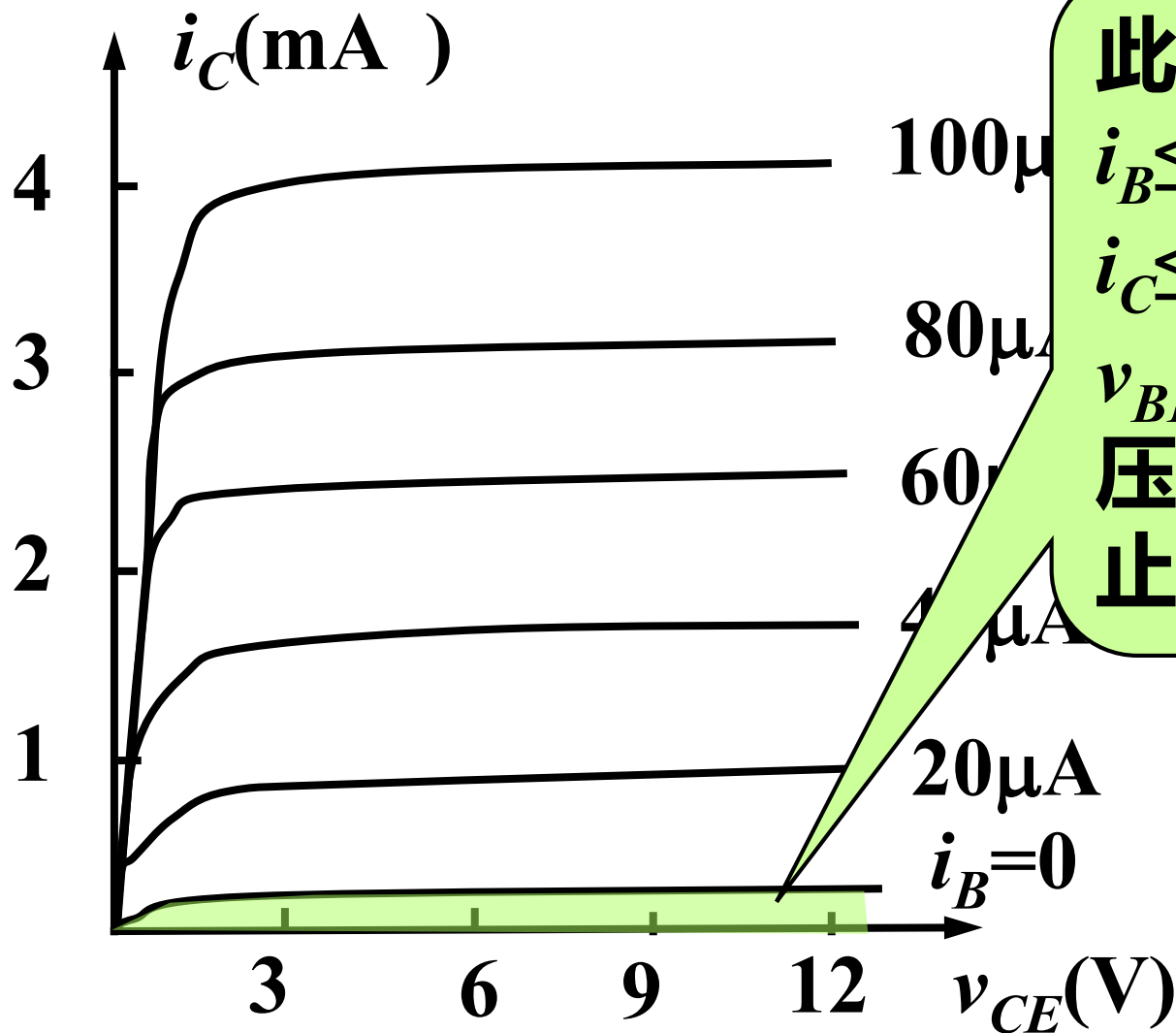


此区域中

$v_{CE} < v_{BE}$ , **集电结正偏**,

$\beta i_B > i_C$ ,  $v_{CE}$  较小, 称为饱和区。

## 二. 共射输出特性曲线



此区域中：

$$i_B \leq 0,$$

$$i_C \leq I_{CEO},$$

$v_{BE} < \text{死区电压}$ , 称为截止区。

## 二. 共射输出特性曲线

### 输出特性三个工作区域的特点:

(1) 放大区: 发射结正偏, 集电结反偏。

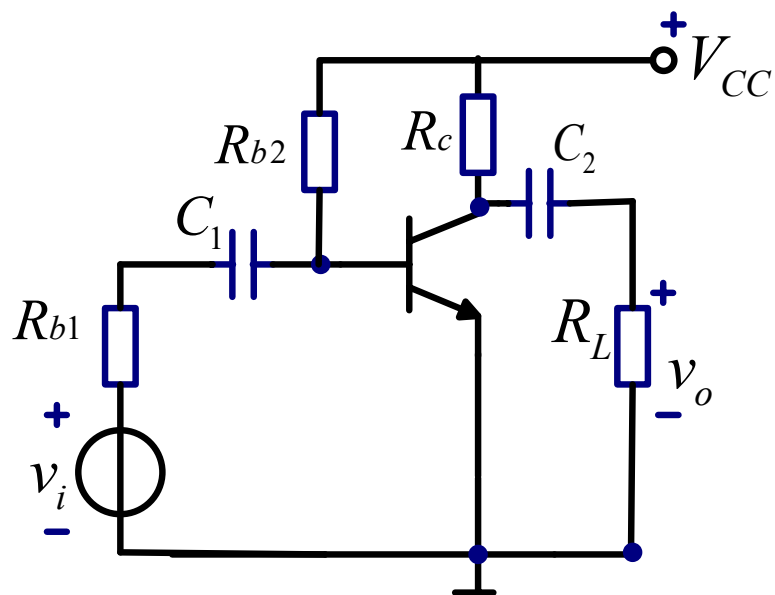
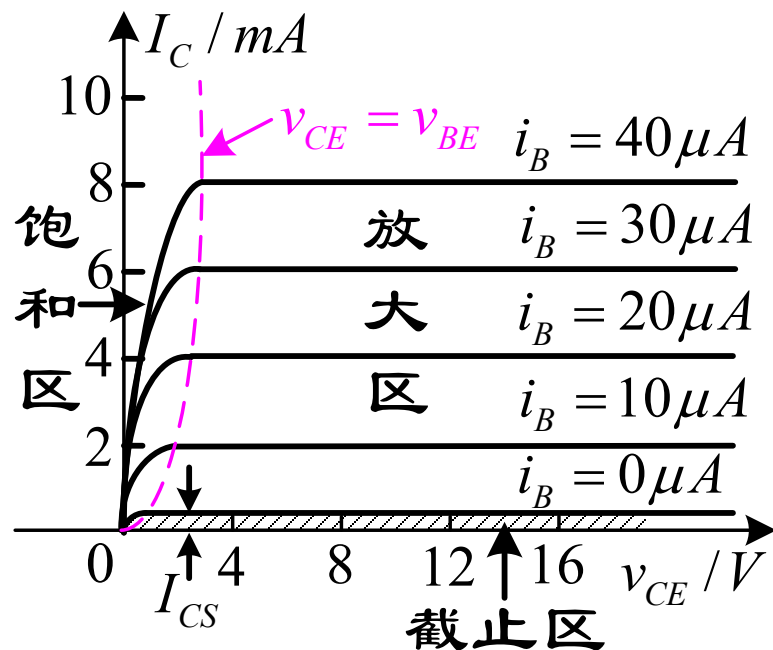
即:  $i_C \approx \bar{\beta} i_B$ , 且  $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$

(2) 饱和区: 发射结正偏, 集电结正偏。

即:  $v_{CE} < v_{BE}$ ,  $\bar{\beta} i_B > i_C$ ,  $v_{CE} \approx 0-0.3V$

(3) 截止区:  $v_{BE} < \text{死区电压}$ ,  $i_B \leq 0$ ,  $i_C \leq I_{CEO} \approx 0$

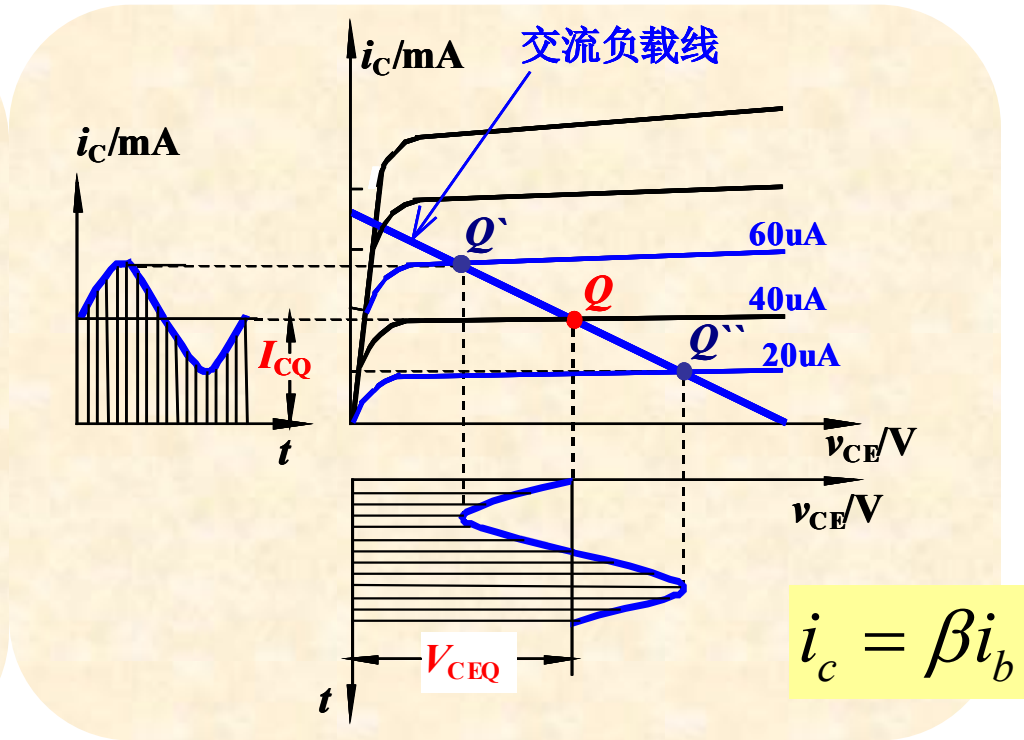
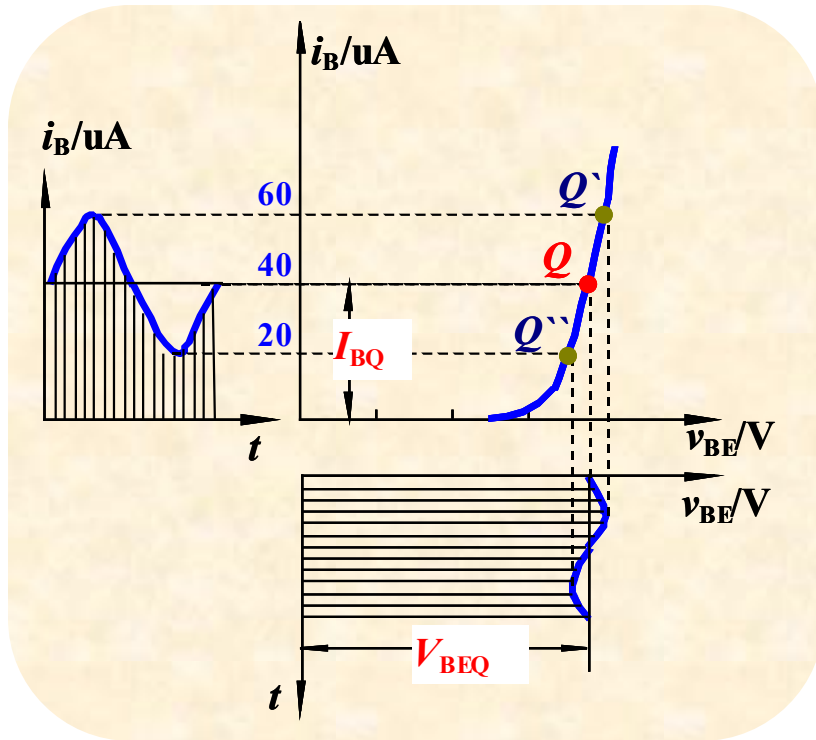
## 二. 共射输出特性曲线



假设三极管处于放大区，此时：

- 增 $R_c$ 的电阻值，三极管会进入？
- 断开 $R_{b2}$ 的连接，三极管会进入？

# (大) 直流偏置信号叠加 (小) 输入交流信号时的波形



$$i_c = \beta i_b$$



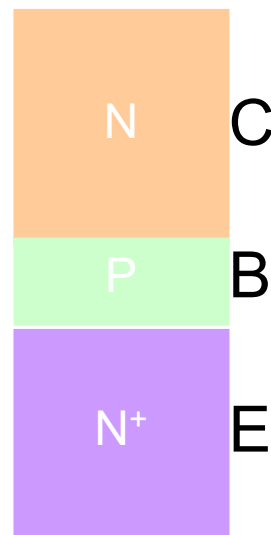
# 5-3-2 双极性晶体管的特性曲线

## 输出特性曲线几点认识

- 三极管工作在放大区时，若改变 $I_B$ 的大小， $I_C$ 的大小随着改变，对应曲线平坦部分上下移动。放大区体现了基极电流 $I_B$ 对集电极电流 $I_C$ 的控制作用。
- 三极管具有恒流特性，对应不同值的 $I_B$ 的每一条输出特性曲线都经过原点，即 $U_{CE}$ 等于零， $I_C$ 也等于零。增大 $U_{CE}$ ，开始时 $I_C$ 迅速上升。当 $U_{CE}$ 达到某个数值后，若再增大 $U_{CE}$ ， $I_C$ 也不会有明显的上升，对应于曲线的平坦部分，这时的 $I_C$ 基本恒定，这就是三极管的恒流特性。
- 三极管电流放大作用能力的大小，反映在输出特性曲线平坦部分间隔的大小上。间隔大，即 $\Delta I_C$ 大，因而放大能力也大。

## 二. 晶体管的四种工作状态

晶体管的四种工作状态：两个PN结的状态决定晶体管的工作状态， $V_{CC}$ 和 $V_{EE}$ 看作外部条件示意



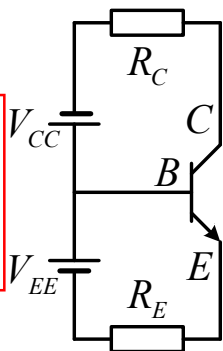
集电结  
发射结

正偏（不要  
求导通）

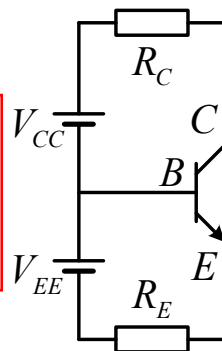
反偏

正偏（应处于导  
通状态）

饱和



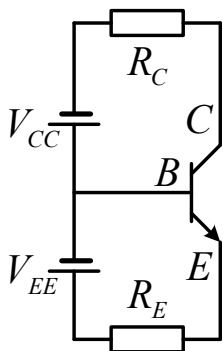
放大



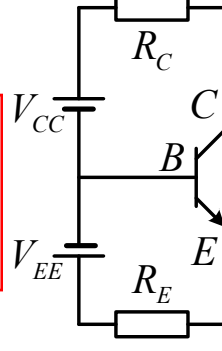
$$v_{BC} < 0$$
$$v_{BE} > 0$$

反偏

倒置



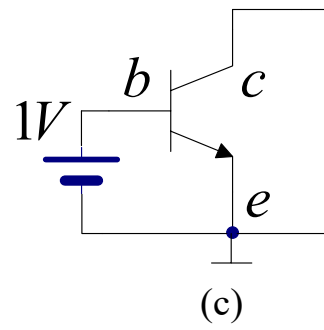
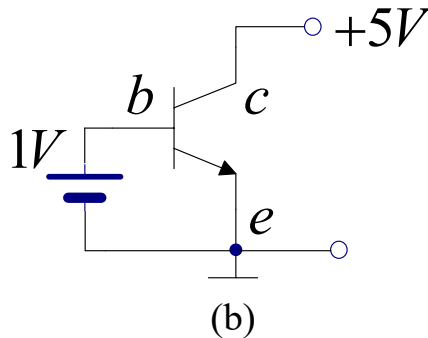
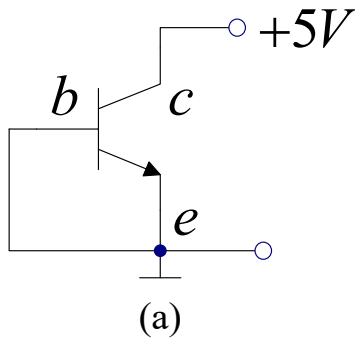
截止



*if (PNP)?*

## 例5-6

判别下图所示电路能否具有电流放大功能，说明原因。



**解：** (a) (c) 2个电路不能满足偏置条件，所以不具备电流放大能力（截止、饱和）。 (b) 电路满足偏置条件（1V最好改成0.7V），所以具有电流放大能力。

# 例题：工作状态判断

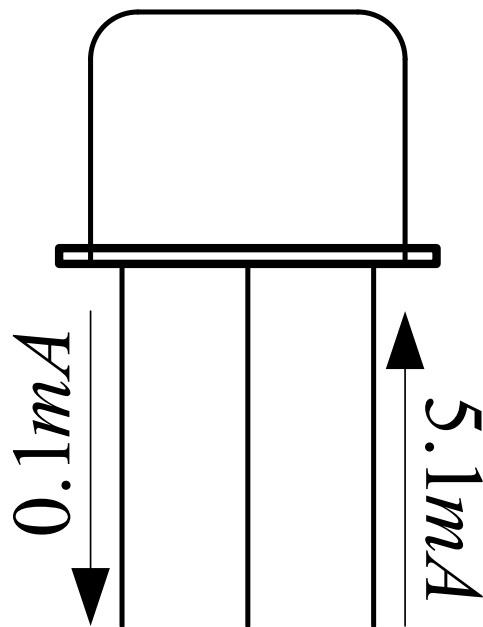
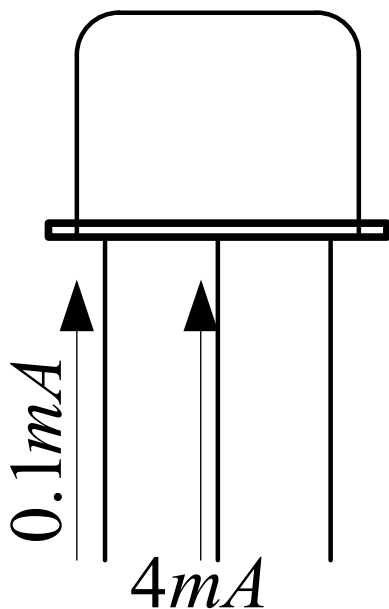
三只硅NPN晶体管的极间电压  $V_{BE}$ 、 $V_{CE}$  如下表所示。试分析其工作状态(放大、截止或饱和)，填入表中

	$V_{BE} / V$	$V_{CE} / V$	$V_{BC} / V$	
	-6	5	-11	截止
	0.7	0.1	0.6	饱和
	0.7	5	-4.3	放大

# 例题：管脚判断

测得工作在放大状态下的两个晶体管的两个电极无交流信号输入时的电流大小及流向如下图所示。求：

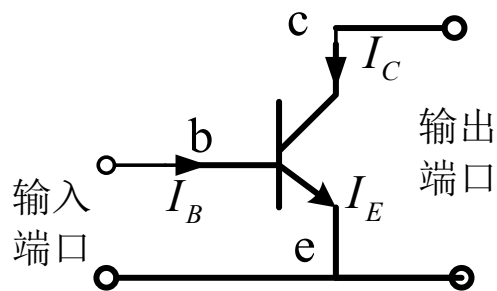
- 另一个电极电流，并标出实际方向
- 标出三个管脚各是什么管脚
- 判断它们各是NPN型还是PNP型，并估算其  $\bar{\alpha}$ ,  $\bar{\beta}$



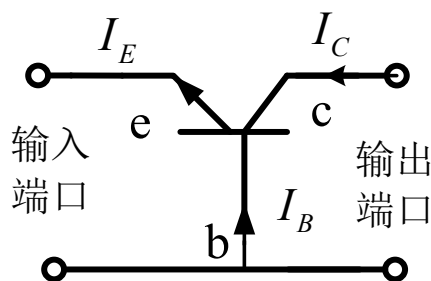
## 5-3-2 三极管的特性曲线

### 1、三极管的三种连接方式（交流组态）

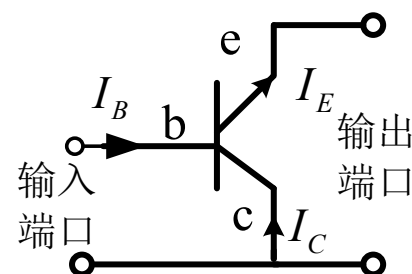
三极管有三个电极，其中一个作为输入端，一个作为输出端，另外一个电极是输入回路和输出回路的公共端。



(a)共发射极



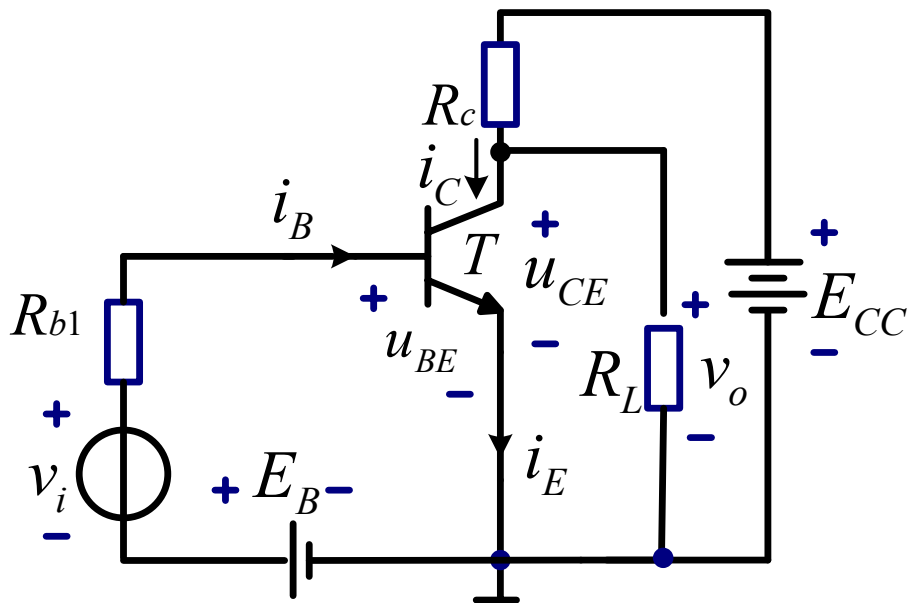
(b)共基极



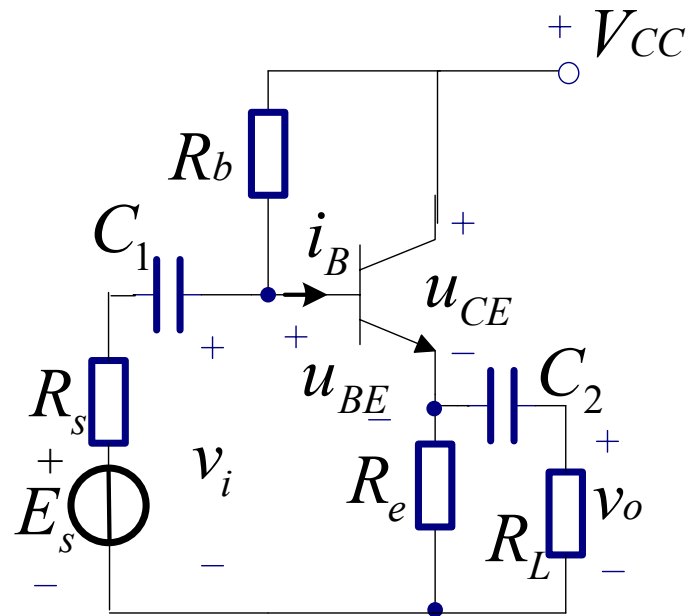
(c)共集电极

对于三极管在电路中无论采取何种连接方式，都可以看成是一个广义节点，满足基尔霍夫电流定律，即  $I_E = I_C + I_B$

# 三极管放大电路(放大工作状态+不同的（交流信号）组态)

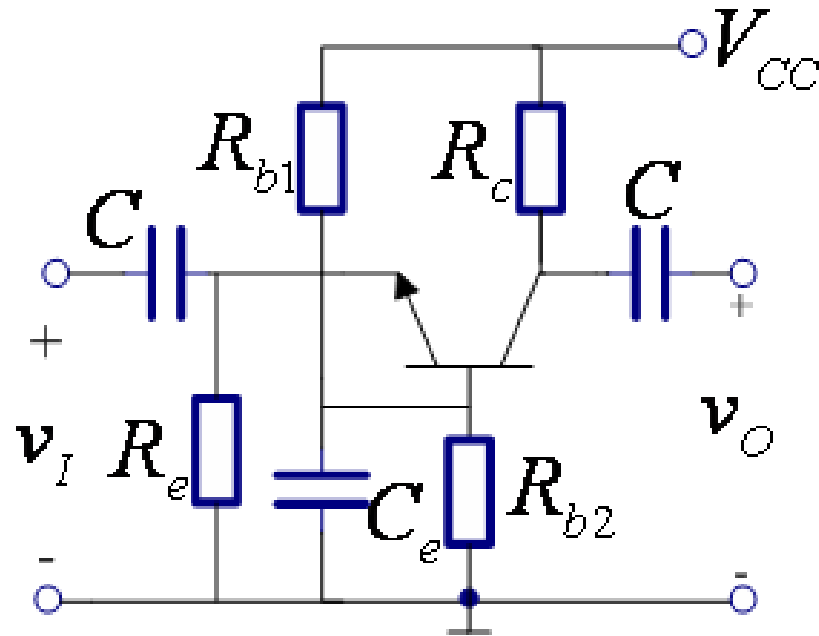


共射极放大电路（直接耦合）



射极输出器

# 三极管放大电路(放大工作状态+不同的（交流信号）组态)



(a)电路原理

共基极放大电路



# 5-3-3 三极管基本参数

## 1. 基极与集电极电流放大系数

在三极管的共射极放大电路中，电流放大系数是在  $U_{CE}$  固定时，集电极电流与基极电流之比，即

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

此外，根据KCL

$$I_E = I_B + I_C$$

## 2. 集-基极反向饱和电流 $I_{CBO}$

发射极开路时，集电极与基极间的反向电流。

它是集电结反向偏置时，集电区和基区中的少数载流子漂移运动所形成的电流。 $I_{CBO}$ 的数值很小，但是受温度影响很大。在室温下，小功率锗管的  $I_{CBO}$ 一般在几微安到几十微安，硅管则在一微安以下。由于  $I_{CBO}$  是集电极电流的一部分，因此会影响三极管的放大性能， $I_{CBO}$  越小越好。

# 5-3-3 三极管基本参数

## 3. 集-射极穿透电流 $I_{CEO}$

$I_{CEO}$  是在基极开路时，从集电极直接穿透三极管而到达发射极的电流，故称穿透电流。

根据三极管电流分配关系，到达集电区的电子数为在基区复合掉的  $\bar{\beta}$  倍，故

$$I_{CEO} = \bar{\beta} I_{CBO} + I_{CBO}$$

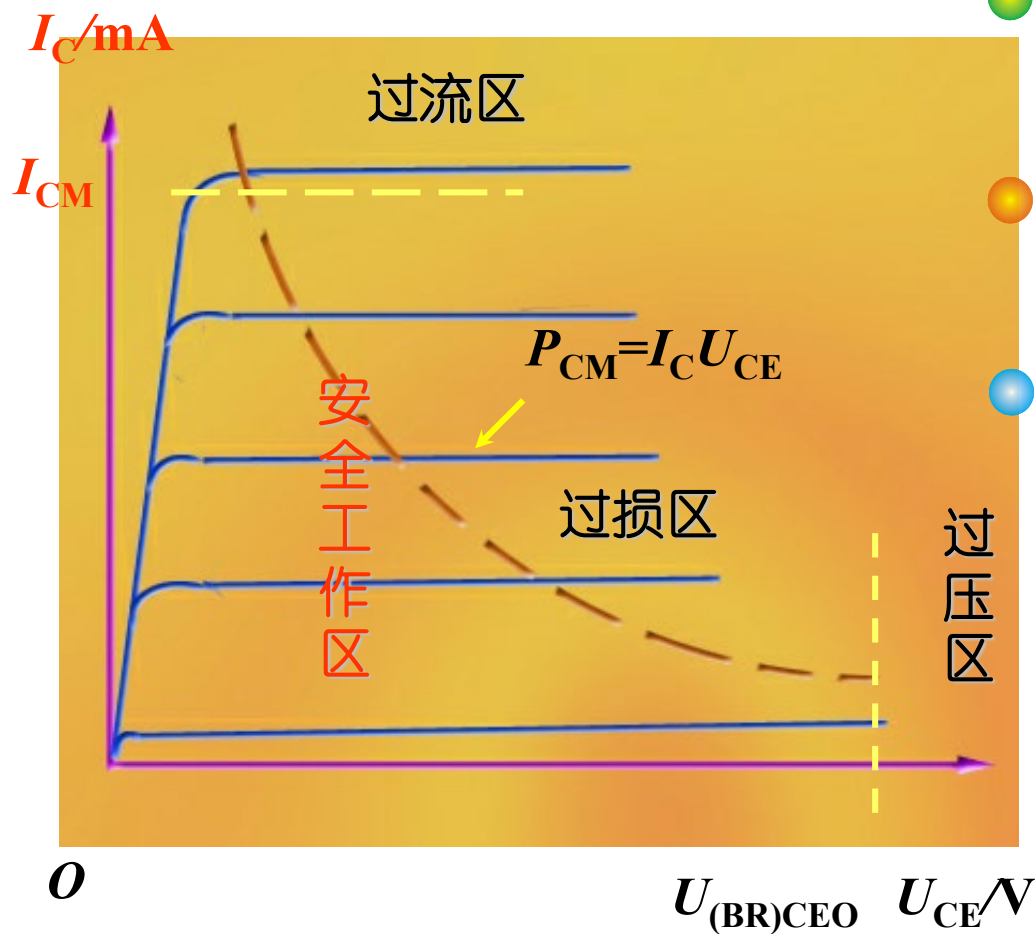
由于  $I_{CBO}$  受温度影响很大，所以  $I_{CEO}$  受温度影响也很大，也就是说温度稳定性很差。特别是  $I_{CEO}$  越大， $\bar{\beta}$  越高的管子，温度稳定性更差。

## 4. 频率特性

三极管的频率特性是一项重要的技术性能指标，是指三极管电流放大能力与工作频率之间的关系。频率特性一般以最高工作频率的数据方式给出，对于重要的三极管也以曲线方式给出。

最高工作频率是使三极管开始失去电流放大能力时的信号频率的二分之一。

## 5. 三极管的极限参数



● 集电极最大允许电流  $I_{CM}$

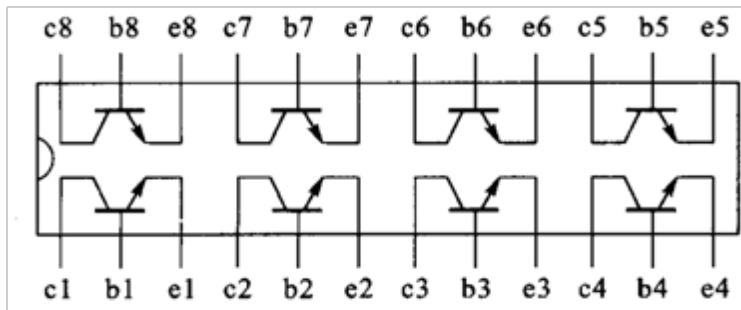
● 集-射反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$

● 集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$

使用时不允许超过这些极限参数.

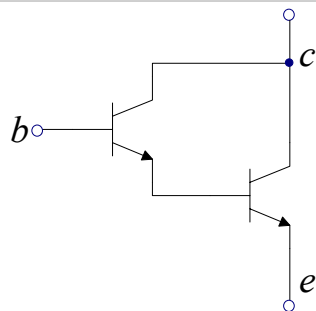
# 5-3-4 三极管分类

1. 按照结构工艺分类，有PNP和NPN型
2. 按照制造材料分类，有锗管和硅管
3. 按照工作频率分类，有低频管和高频管
4. 按照允许耗散的功率大小分类，有小功率管和大功率管
5. 多管阵列

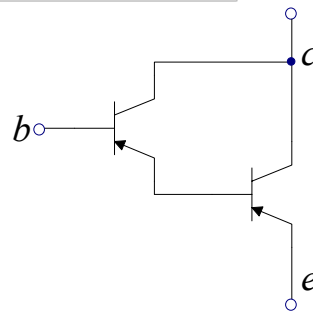


6. 达林顿管

7. 光敏三极管



NPN型达林顿管



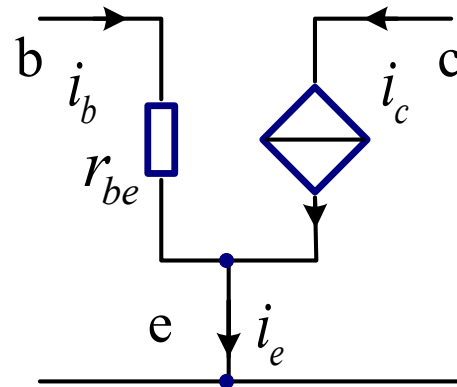
PNP型达林顿管

## 5-3-5 三极管的低频小信号电路模型

低频小信号模型是分析三极管电路的简化方法，该方法需要满足两个前提条件：

**低频**——电路信号频率远小于三极管工作频率。三极管的结电容忽略不计。

**小信号**——一是输入信号电压幅度的变化使三极管基极电流动态变化的范围较小，处于放大区，基极电流的变化可近似为线性。二是小信号时三极管的输入和输出特性可以被看成是线性的，三极管近似成一个线性器件。



三极管工作在放大状态时，低频小信号模型如图所示：

其中， $r_{be}$ 是b-e结导通电阻，对于低频小功率管可用下式进行估算：

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_E(mA)} \quad \text{一般为几百欧姆到几千欧姆}$$



## 例5-9

如图电路，设所使用的三极管工作频率为150 MHz，最高工作电压为12V，设输入信号为正弦波，其峰-峰值为6V，频率为10kHz。能否用三极管低频小信号模型代替三极管？绘制等效电路模型。

**解：** 根据题中所给条件可知，信号频率远小于三极管的工作频率，同时，输入信号的幅度也远小于所使用的电源电压幅度，可以使用三极管低频小信号模型。得到电路的等效电路如图所示。

