

# 电子电路基础c

文凤

书山有路勤为径  
学海无崖苦作舟

## 第二章 半导体受控器件基础

### 2.1 双极型晶体管的电量制约关系

关注PN结的相互影响，以及制造要求对导电特性影响

### 2.2 场效应管的电量制约关系

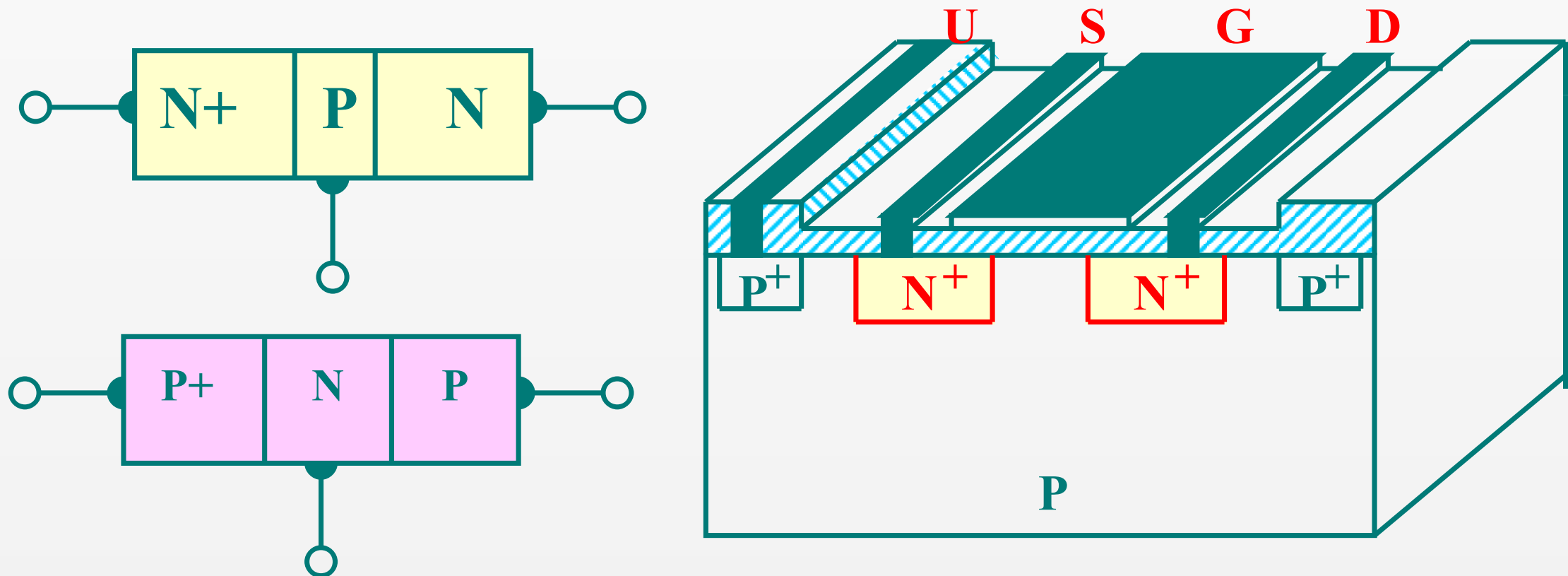
关注结构对导电特性影响

### 2.3 元器件的模型研究与仿真的工程意义

关注仿真模型对电路分析的重要价值

# 概述

- ❖ 鉴于晶体管与场效应管原理及电路的相似性，先讲清晶体管导电原理，再讲场效应管的导电特性。
- ❖ 因半导体P、N区的构成复杂性提高，非线性导电的分析和描述更为复杂。



## 2.1 双极型晶体管的电量制约关系

晶体三极管(Semiconductor Transistor) 又称双极型晶体管(Bipolar Junction ransistor :BJT)，简称三极管。

### 一、三极管的种类：

按材料分:硅管和锗管； 按结构分:NPN型管和PNP型管；

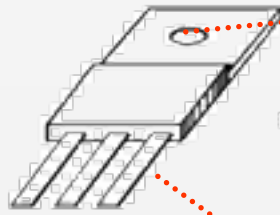
按频率分:高频管和低频管；

按功率分:小功率(<500mW)、中功率(0.5~1W)和大功率管(>1W)等

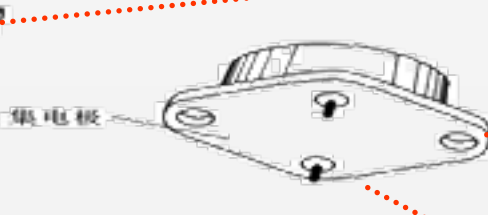
无论那种类型的三极管，都是由两个靠得近且背靠背排列的PN结组成。按排列方式不同，三极管分为NPN和PNP管。



小功率管



中功率管



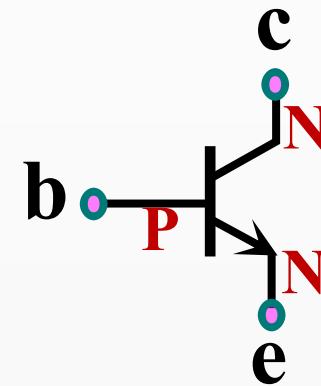
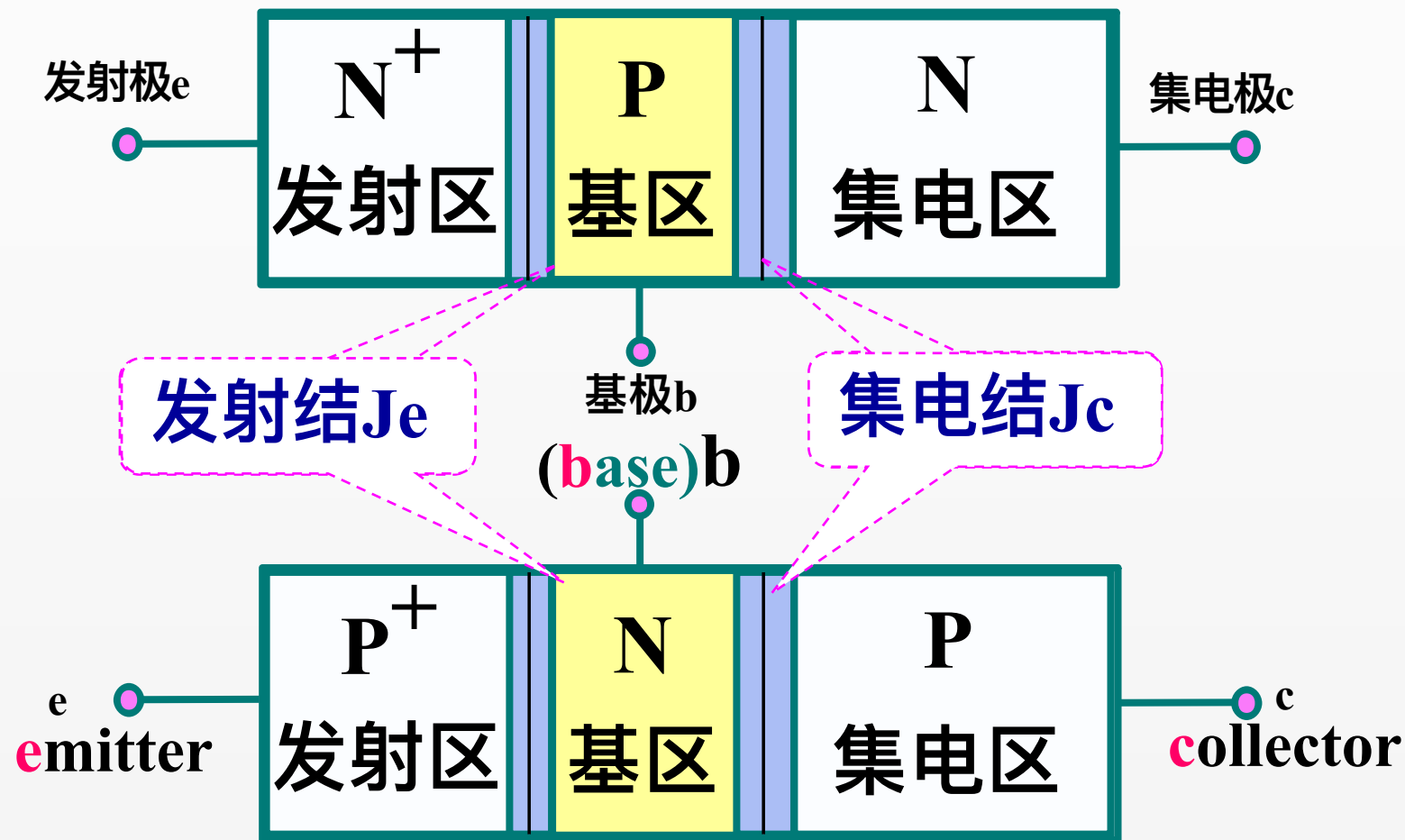
大功率管

为什么有孔？

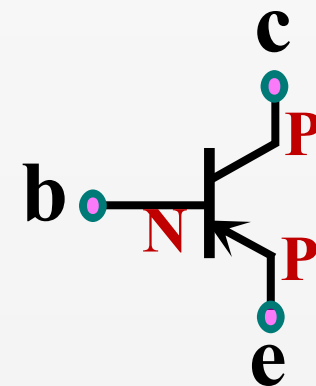
## 二、三极管结构示意图及电路符号

NPN管结构示意图:

NPN管电路符号:



PNP管电路符号:



PNP管结构示意图

➤ **三极管内部结构特点:**发射区为高掺杂(发射多子); 基区很薄且掺杂浓度低(传递和控制载流子); 集电结面积大(收集多子)。

无论是NPN还是PNP管, 都有两个PN结, 三个区, 三个电极。

## 2.1.1 晶体管的导电原理

### 一、三极管的工作模式及其外部工作条件

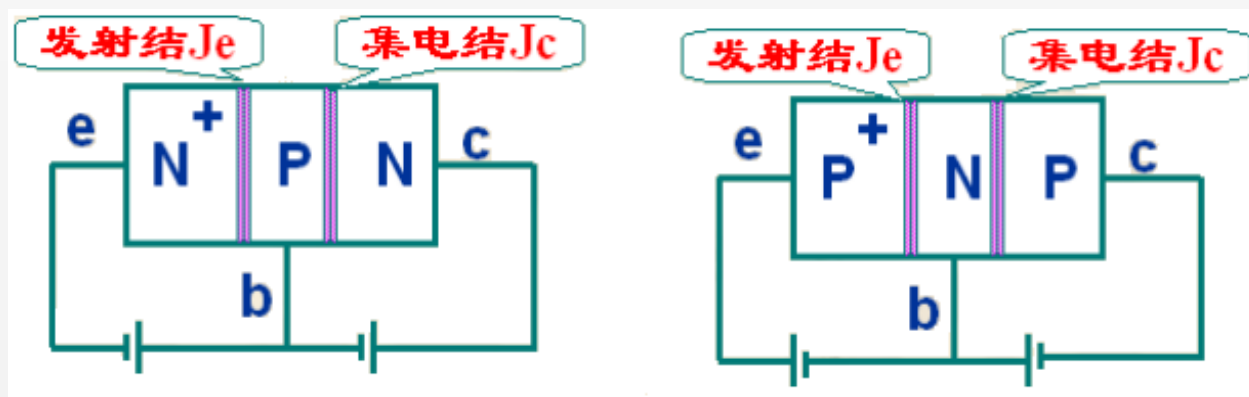
发射结**正偏**，集电结**反偏**：放大和击穿模式（放大情况最常用）

发射结**正偏**，集电结**正偏**：饱和模式 } (用于开关电路中)

发射结**反偏**，集电结**反偏**：截止模式 }

发射结**反偏**，集电结**正偏**：反向工作模式（少用）

在放大电路中三极管主要工作于**放大状态**，即要求：  
发射结**正偏**（其正偏压降近似等于发射结的导通压降），  
集电结**反偏**（反偏压降远远大于其导通电压才行）。



基极电位处于中间，  
b、e间压降小 $\approx V_{BE(on)}$ ，  
b、c间反偏压降大

对NPN管要求： $V_e < V_b < V_c$

对PNP管要求： $V_e > V_b > V_c$

对NPN管 { 发射结: 正偏  $v_{BE} \geq V_{BE(on)}$ , 反偏  $v_{BE} \leq V_{BE(on)}$   
集电结: 正偏  $v_{CE} < V_{CE(sat)}$ , 反偏  $v_{CE} \geq V_{CE(sat)}$

结合例、P55习题  
2-4、2-6、2-7

放大模式下的工作原理

# 放大状态下的外部条件分析

□ **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。

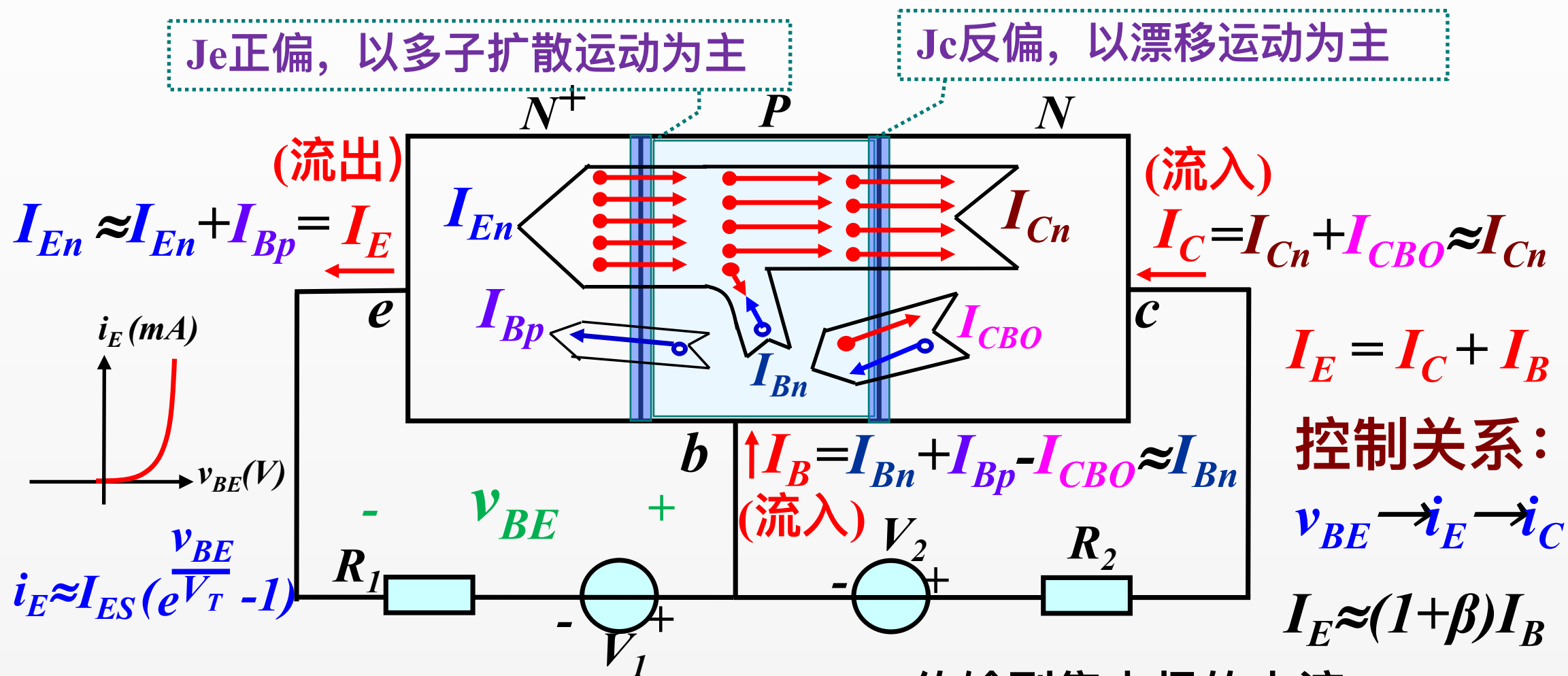
□ **基区很薄：** 可减少多子传输过程中在基区的复合机会，保证绝大部分载流子扩散到集电结边界。

□ **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。



## 二. 放大情况（导电原理）



$$\alpha = \frac{\text{传输到集电极的电流}}{\text{发射极注入电流}}$$

$$= \frac{I_{Cn}}{I_E} \approx \frac{I_C}{I_E} \leq 1 (0.9 \sim 0.99)$$

$$\Rightarrow I_C \approx \alpha I_E$$

$$\beta = \frac{\text{传输到集电极的电流}}{\text{基极注入电流}}$$

$$= \frac{I_{Cn}}{I_B} = \begin{cases} \approx \frac{I_{Cn}}{I_E - I_{Cn}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \\ \approx I_C / I_B \Rightarrow I_C \approx \beta I_B \end{cases}$$



# 三极管的参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 等及其温度特性

一、直流参数  $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$   $\left\{ \begin{array}{l} \bar{\alpha} = I_{CN} / I_E \approx I_C / I_E \quad (0.9 \sim 0.99) \\ \bar{\beta} \approx I_C / I_B \quad (50 \sim 300) \end{array} \right.$

其值仅与三极管的几何尺寸和掺杂浓度有关

二、交流参数  $\alpha$ 、 $\beta$   $\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \Delta i_C / \Delta i_E = i_c / i_e \\ \beta = \Delta i_C / \Delta i_B = i_c / i_b \end{array} \right.$

放大时有：

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

三、温度特性：T↑时， $V_{BE}$ 将减小， $I_{CBO}$ 、 $I_{CEO}$ 、 $\beta$ 都将增大

- 温度每升高1°C， $\Delta \beta / \beta$  增大(0.5 ~ 1)%
- 温度每升高1 °C， $V_{BE(on)}$  减小(2 ~ 2.5)mV
- 温度每升高10 °C， $I_{CBO}$  增大一倍

$I_{CEO}$ 为穿透电流，指基极开路时集电极直通到发射极的电流

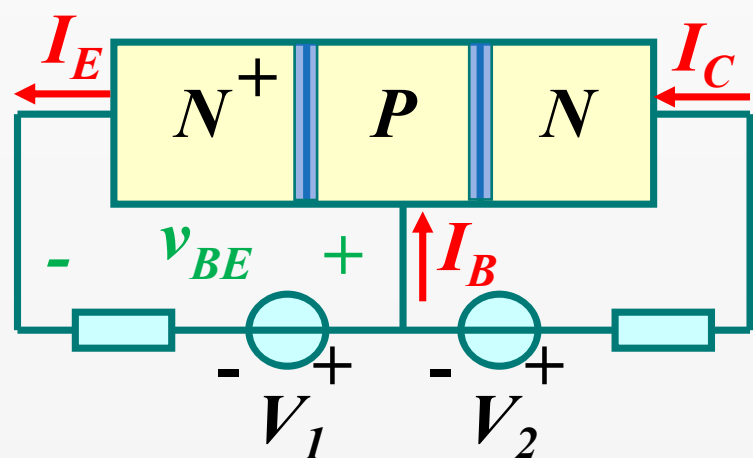
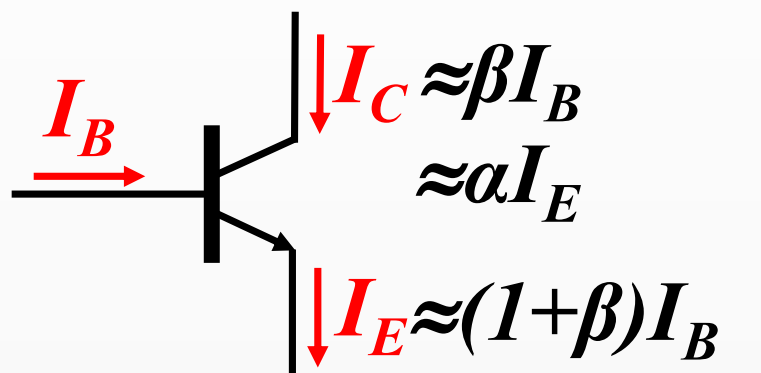
$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$I_{CBO}$ 、 $I_{CEO}$ 的值越小，三极管的质量越高

温度对三极管的影响集中体现在对 $i_C$ 的影响上。  
在设计电路时若使 $i_C$ 稳定，电路则基本稳定。

$I_{CBO}$ 为集电结的反向饱和电流

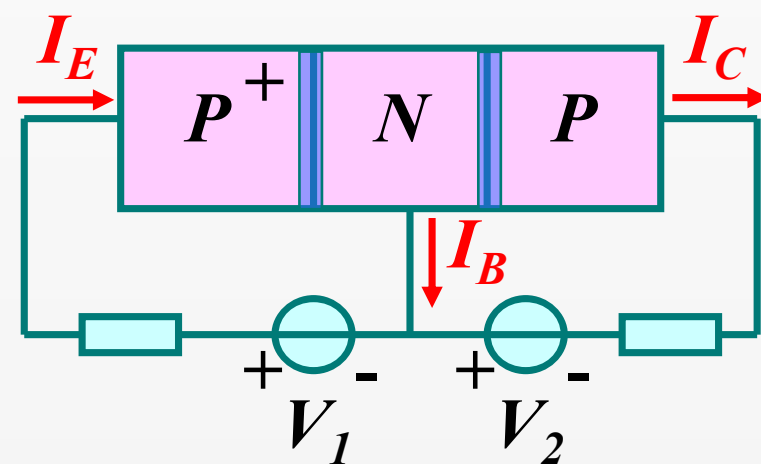
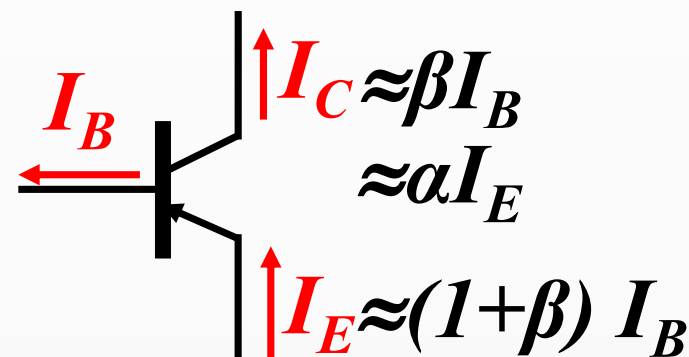
# 三极管特性——具有正向受控作用



$$V_e < V_b < V_c$$

**注意:**

NPN与PNP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。



$$V_e > V_b > V_c$$

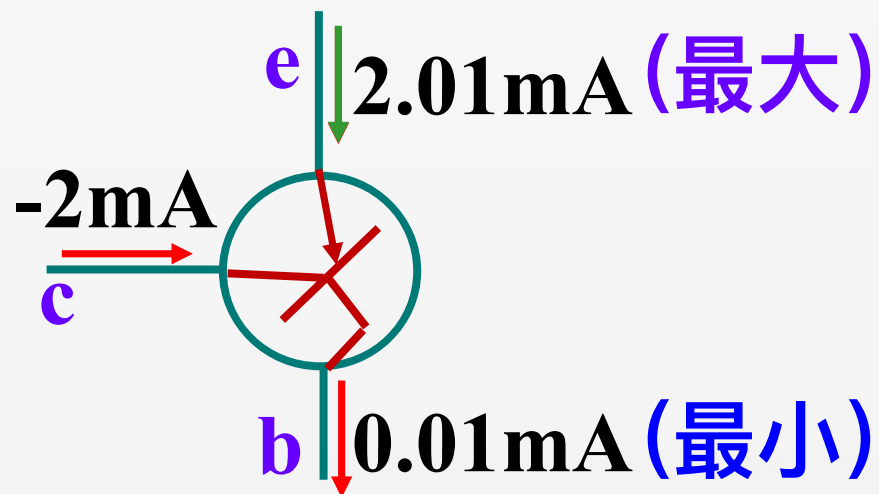
无论NPN还是PNP管,在放大状态下:  $I_C$  主要受正向发射结电压  $V_{BE}$  的控制,而与反向集电结电压  $V_{CE}$  近似无关。

# 根据各极电流关系判断管子类型举例

已知某放大电路的三极管两个电极的电流如图所示，

1. 请计算余下电极的电流大小？
2. 请在图中分别标出三极管的e、b、c
3. 请问该管是PNP还是NPN管，在圆圈里画出三极管的电路符号；
4. 请估算该管子的 $\beta$ =？

PNP 管

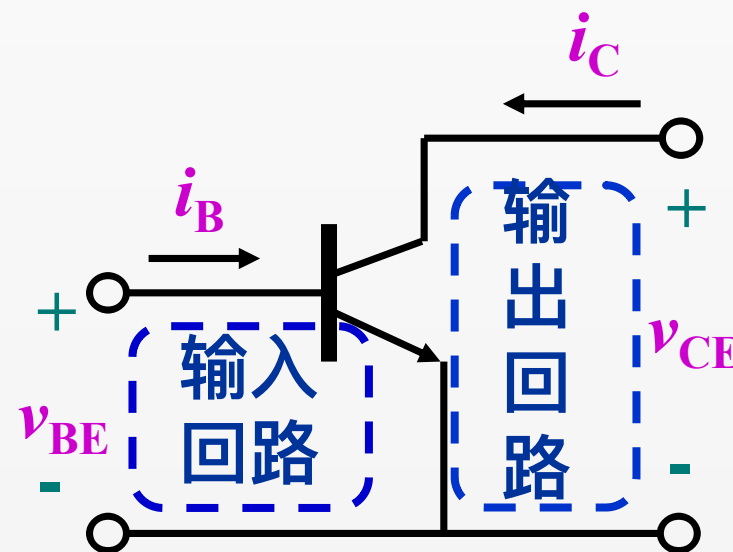
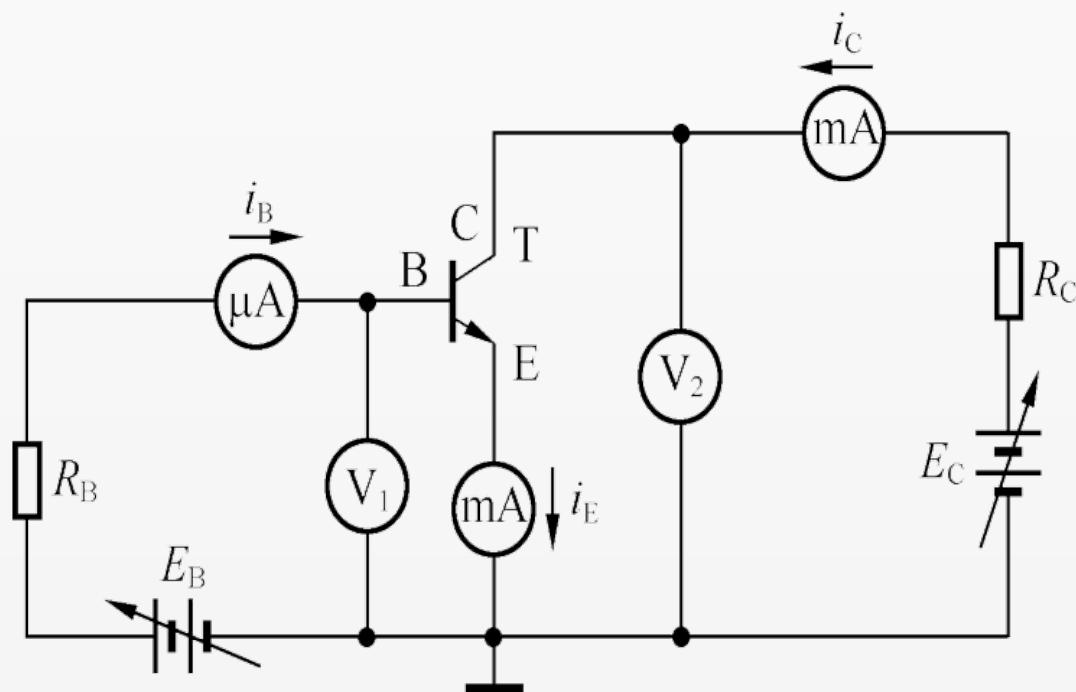


$$\beta \approx I_C / I_B = 200$$

## 2.1.2 三极管的伏安特性

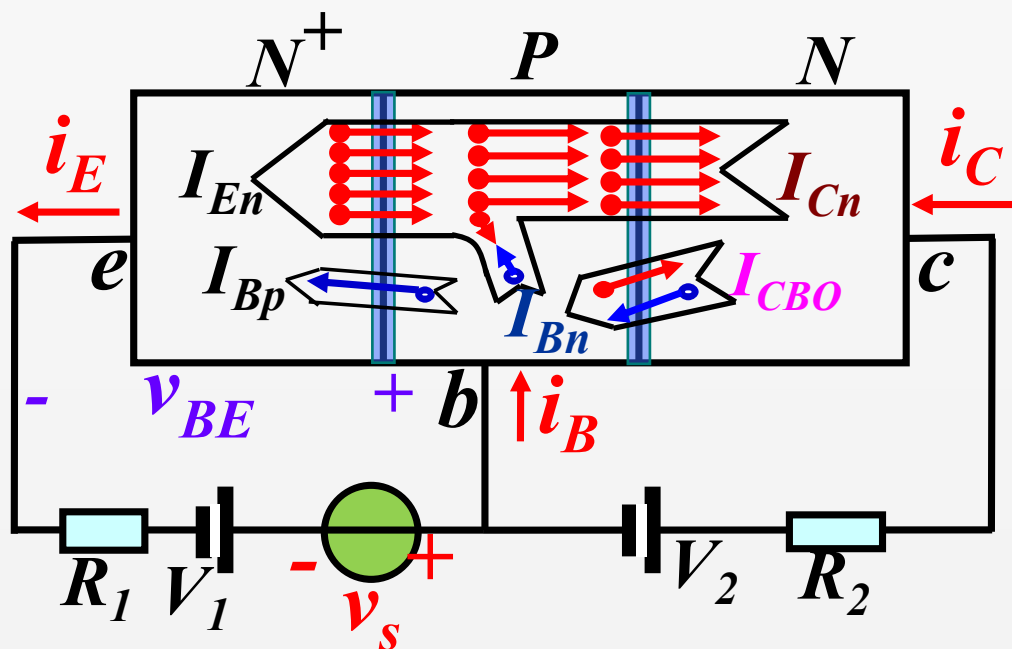
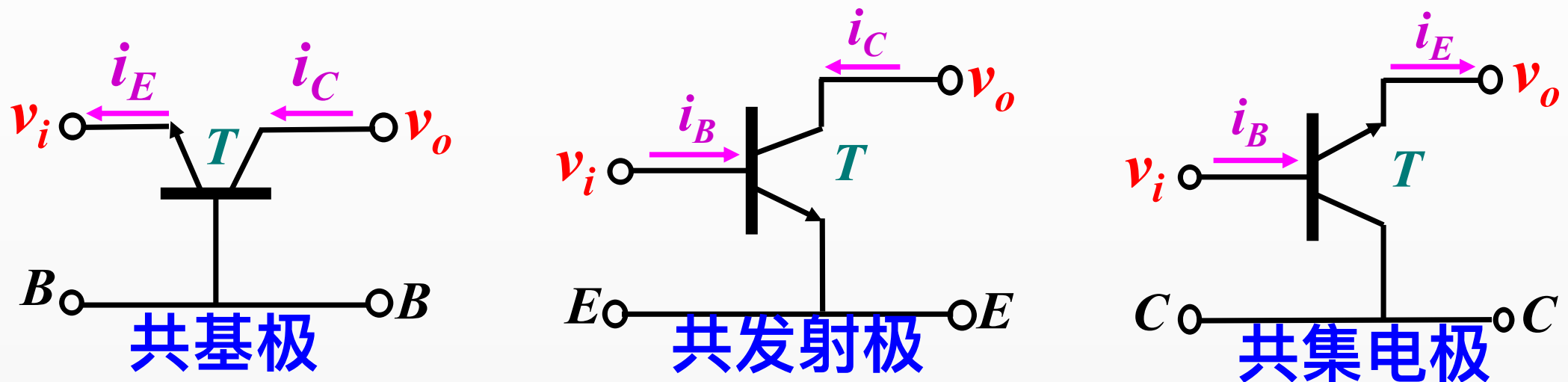
伏安特性曲线是三极管通用的曲线模型，它适用于任何工作模式。(三极管有三种组态，以共发射极为例)

### ► 晶体管的伏安特性外部测试电路



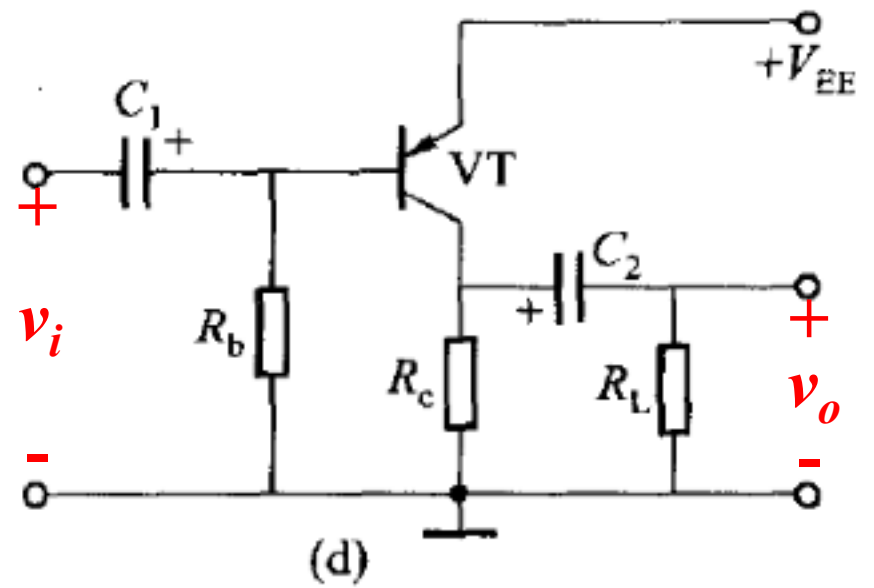
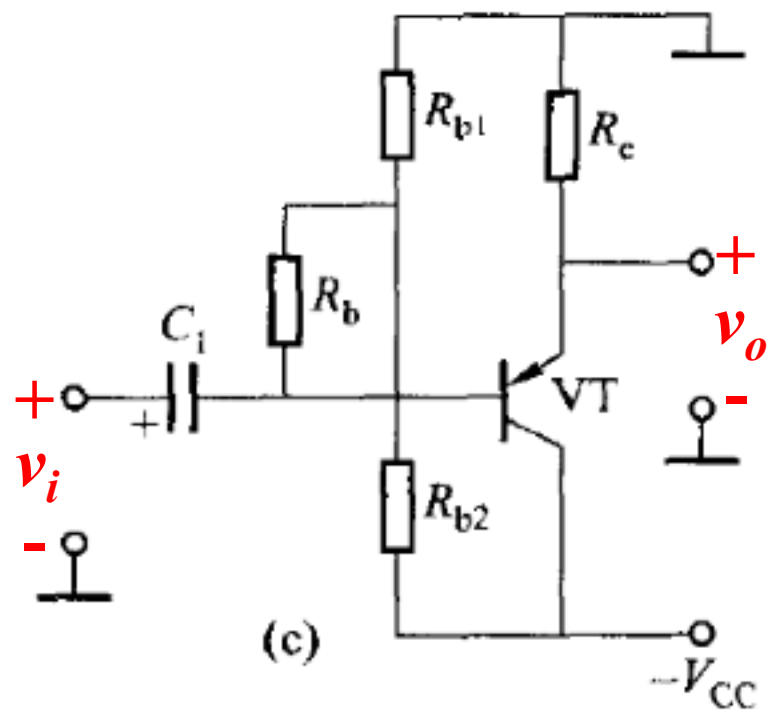
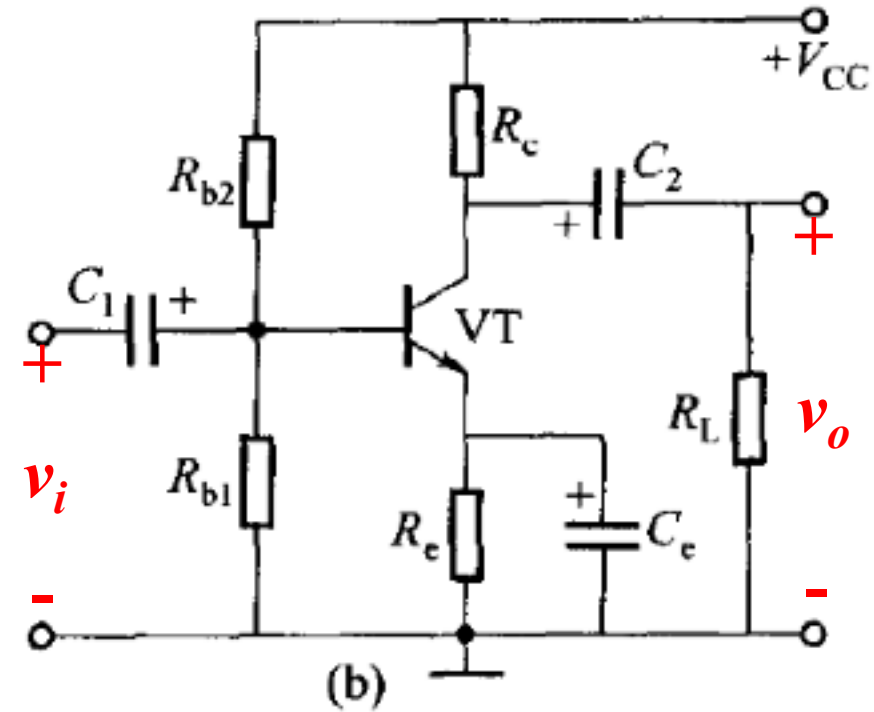
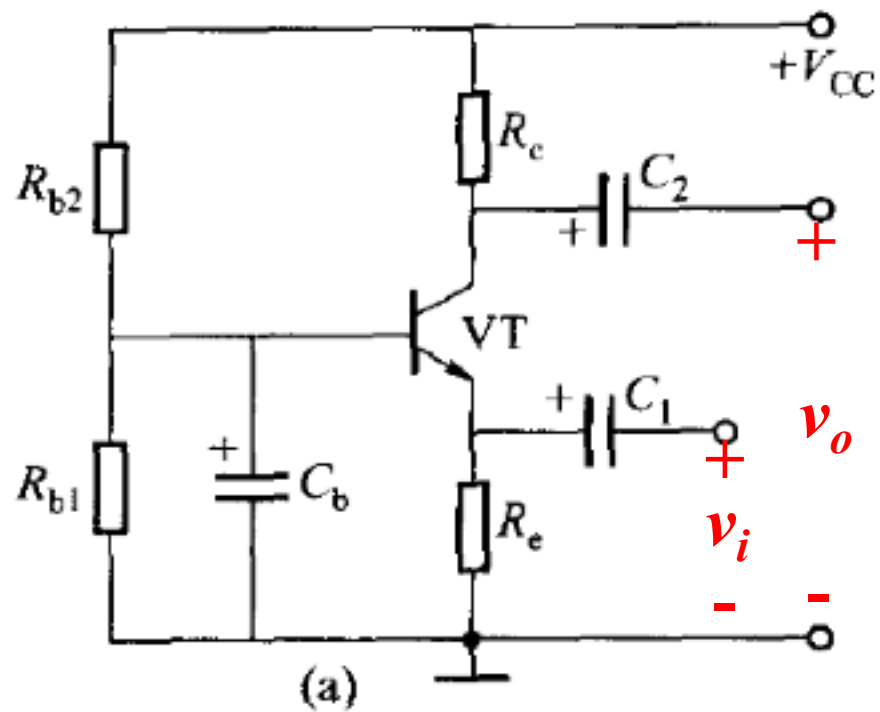
共发射极 {  $\begin{cases} \text{输入特性: } i_B = f_{1E}(v_{BE}) \Big|_{v_{CE} = \text{常数}} \\ \text{输出特性: } i_C = f_{2E}(v_{CE}) \Big|_{i_B = \text{常数}} \end{cases}$

# 三极管的三种连接方式即三种组态 P74习题3-8



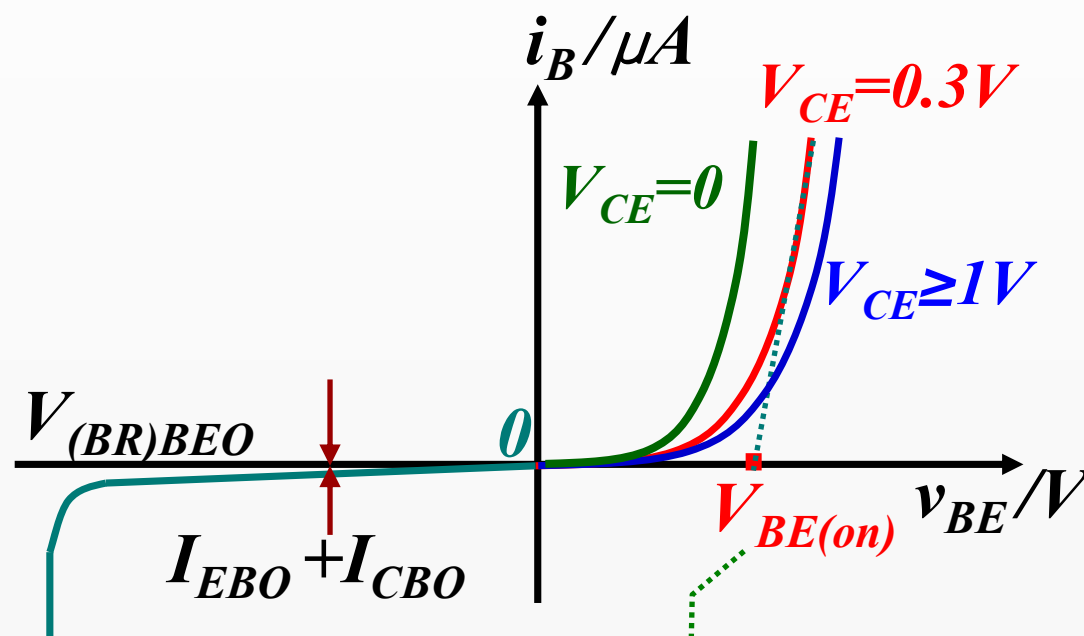
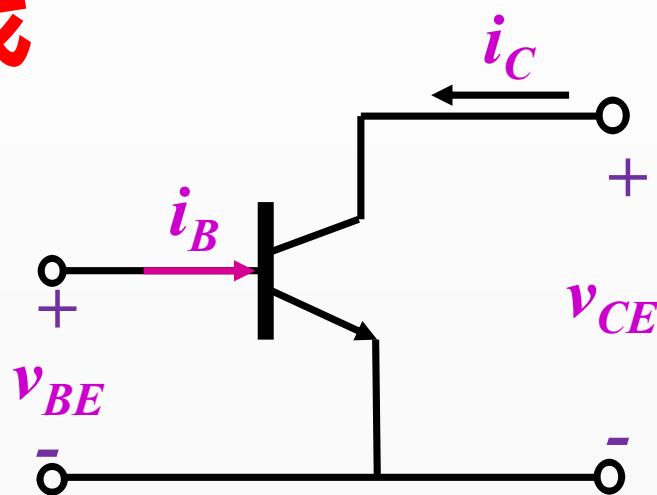
- 电路组态是针对信号而言的。
- 观察：  
输入信号从哪个电极加入，  
输出信号从哪个电极取出，  
剩下的电极即为组态形式。

# 组态判断



# 输入特性曲线

$$i_B = f_{1E}(v_{BE}) \quad | \quad v_{CE} = \text{常数}$$



□  $v_{CE}$  一定:

类似二极管伏安特性。

$V_{BE(on)}$  为发射结导通电压

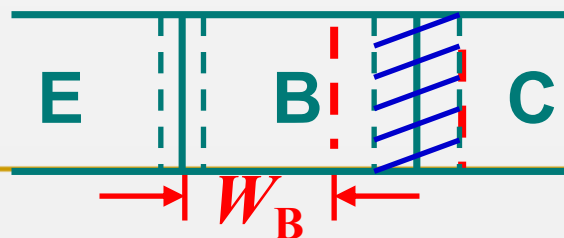
□  $v_{CE}$  增加: 正向特性曲线略右移。

由于  $V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} > 0$

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。

基区宽度调制效应



注:  $V_{CE} > 0.3V$  后, 曲线移动可忽略不计。

工程上:

硅管  $V_{BE(on)} \approx 0.7V$   
锗管  $V_{BE(on)} \approx 0.2V$

返回

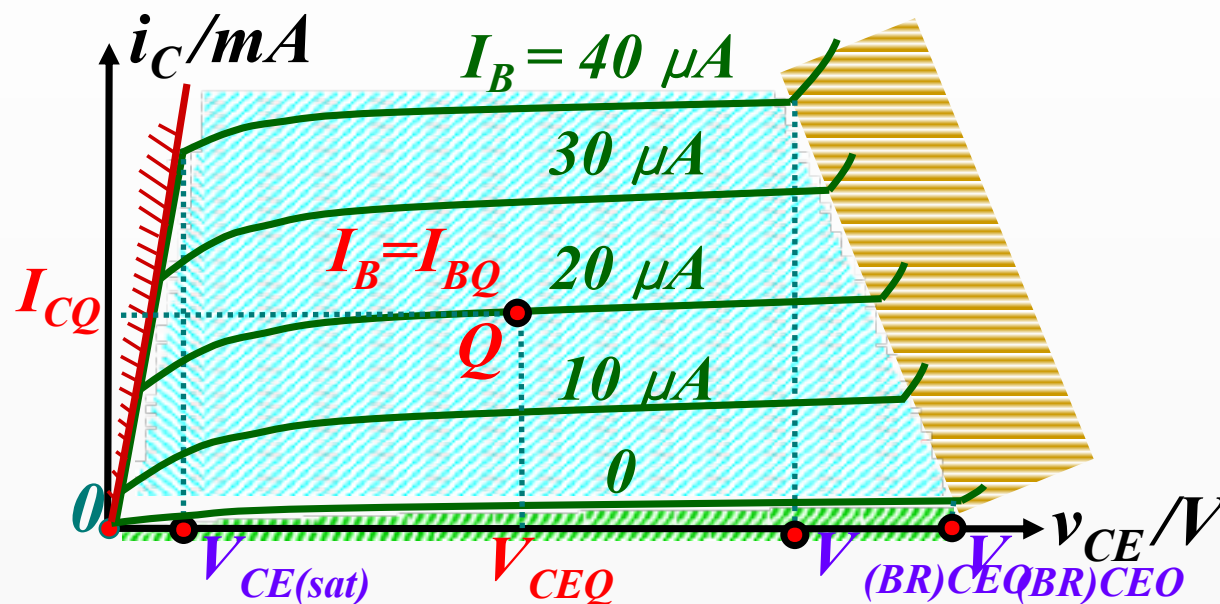


# 输出特性曲线

$$i_C = f_{2E}(v_{CE}) \mid i_B = \text{常数}$$

输出特性曲线可划分四个区域：

饱和区、放大区、截止区、击穿区。



饱和区 { 条件：发射结正偏，集电结正偏 ( $v_{BE} \geq V_{BE(on)}$ ,  $v_{CE} < V_{CE(sat)}$ )  
特点： $i_C$  受  $v_{CE}$  影响，不受  $i_B$  控制， $I_C \neq \beta I_B$ 。

放大区 { 条件：发射结正偏，集电结反偏 ( $v_{BE} \geq V_{BE(on)}$ ,  $v_{CE} > V_{CE(sat)}$ )  
特点： $i_C$  受  $i_B$  控制(受控特性)，与  $v_{CE}$  几乎无关(恒流特性)。

$$\beta = \Delta i_C / \Delta i_B = i_C / i_b \approx \text{常数} \Rightarrow i_C = \beta i_b \quad (\text{三极管放大信号的原理})$$

截止区 { 条件：发射结反偏，集电结反偏 ( $v_{BE} < V_{BE(on)}$ ,  $v_{CE} \geq V_{CE(sat)}$ )  
特点： $i_B = 0$ ,  $i_C \approx 0$ 。

击穿区：反向击穿电压  $V_{(BR)CEO}$

安全工作区及温度特性

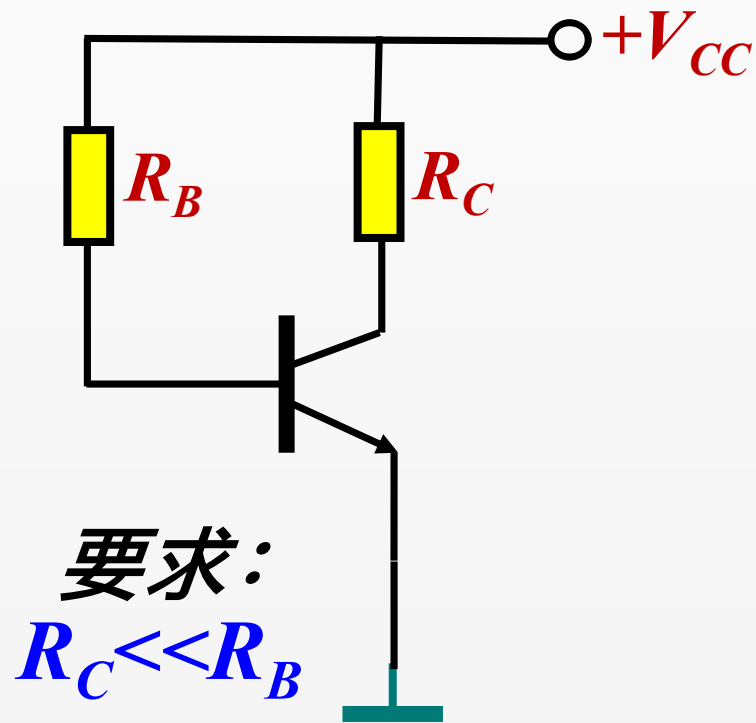
如何设计电路让三极管工作于放大区域

返回

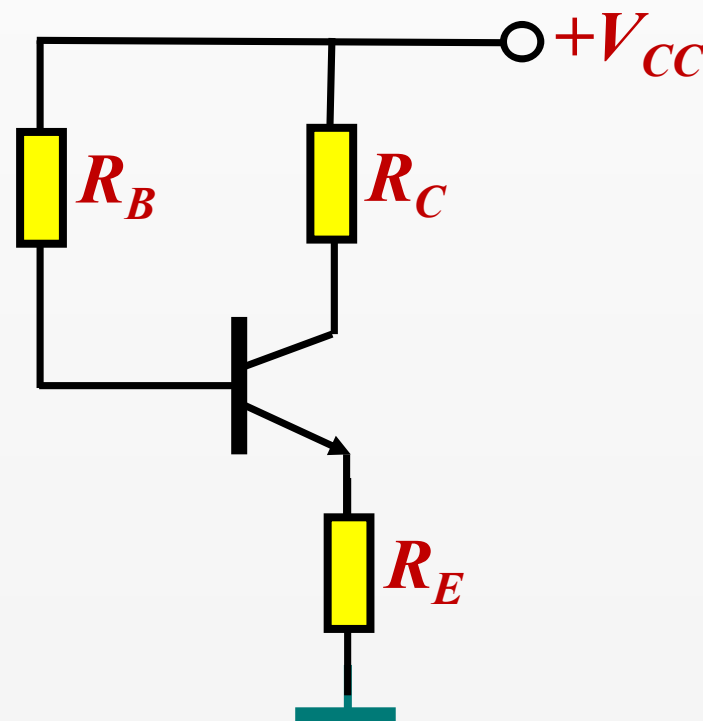
# 设计：如何让三极管工作于放大状态

**放大条件：**发射结正偏，集电结反偏。

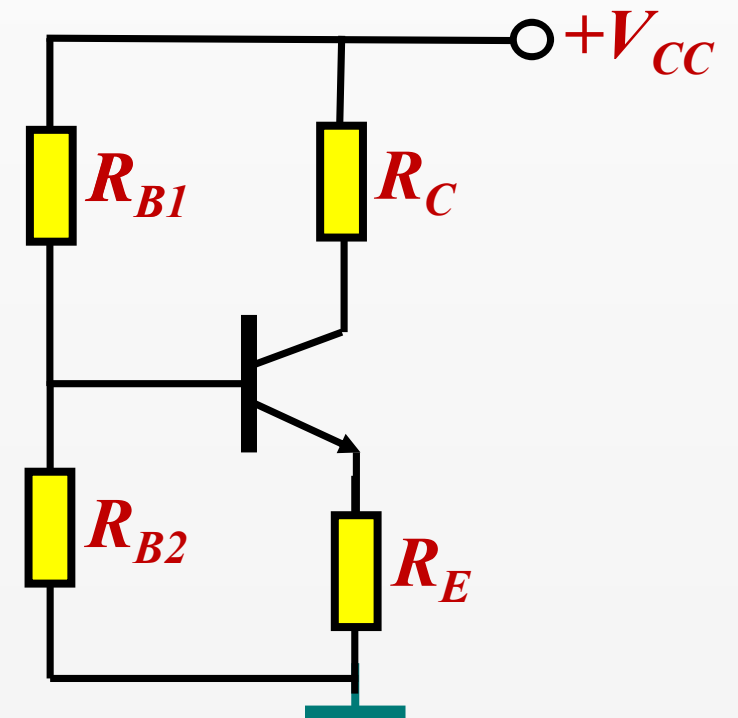
对NPN要求： $V_e < V_b < V_c$



(a) 简单偏置电路



(b) 射极偏置电路



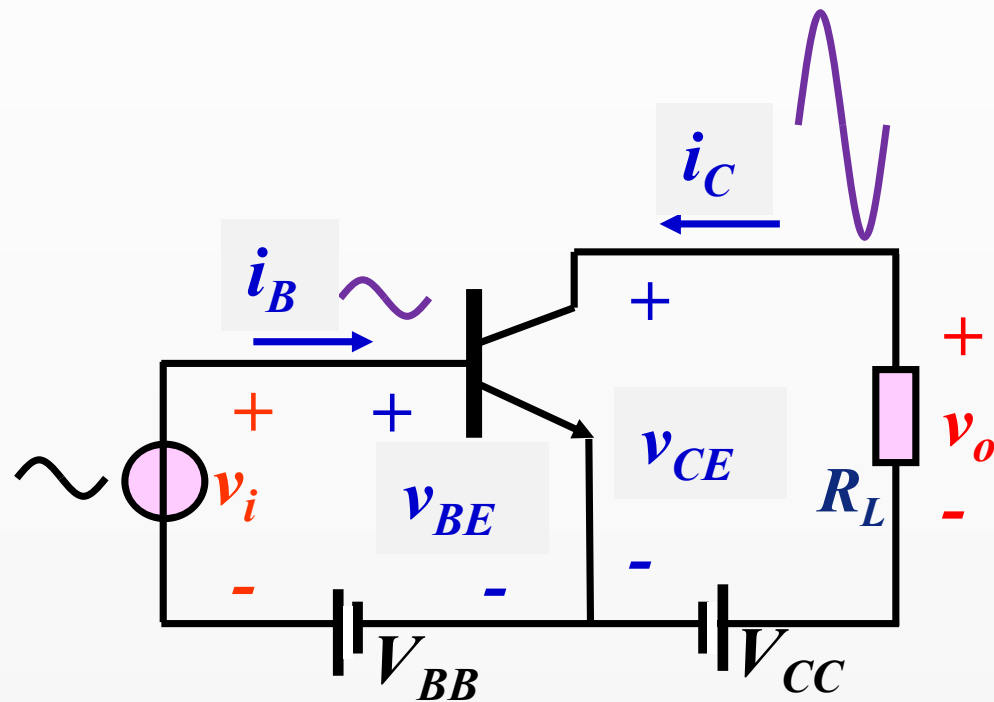
(c) 分压式偏置电路

思考：若是PNP管应该如何设置？

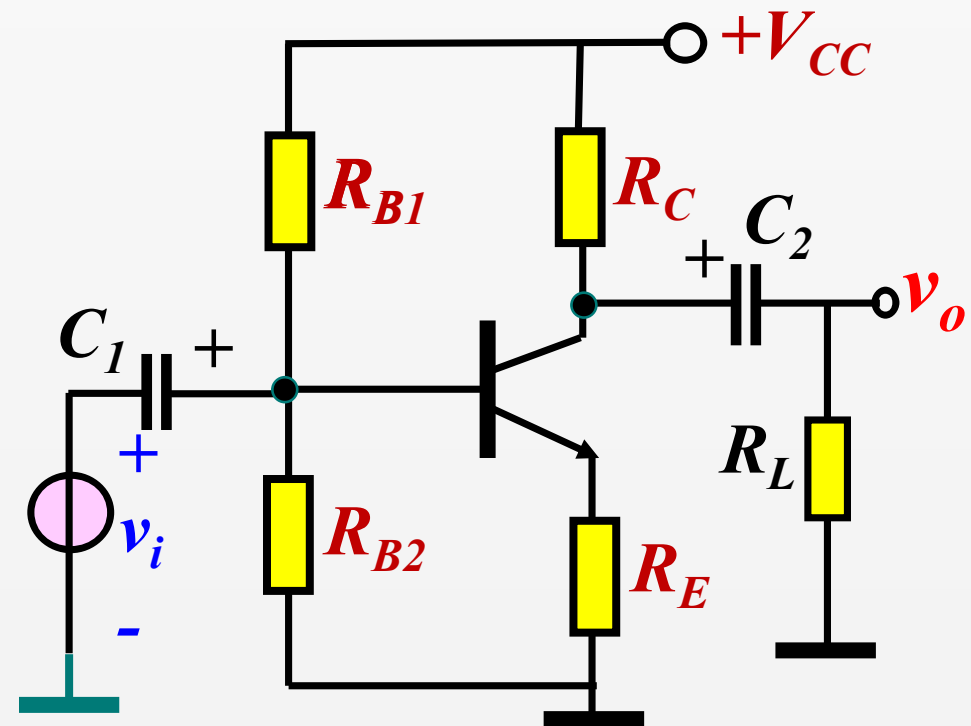
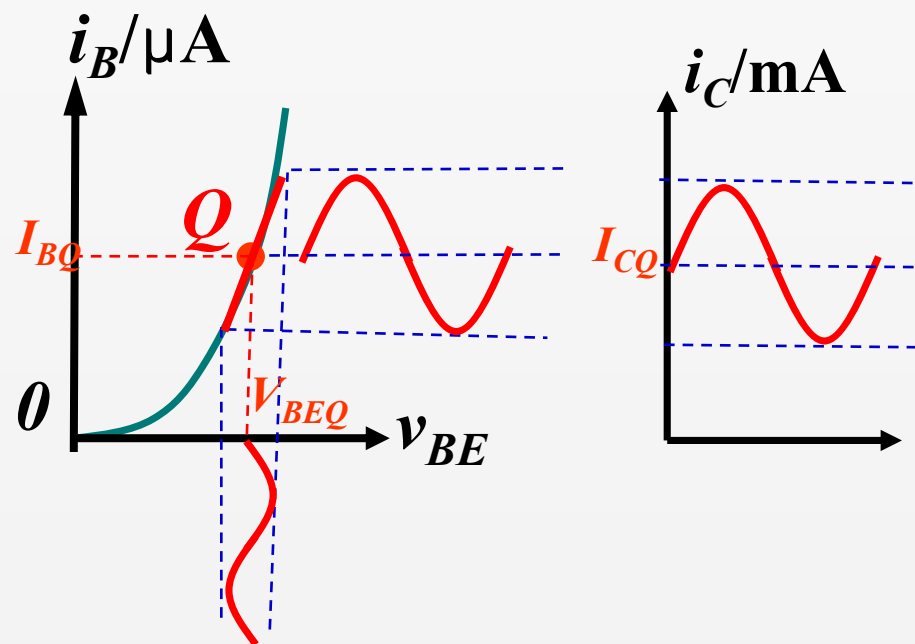
[返回输出特性曲线](#)

[返回放大区](#)

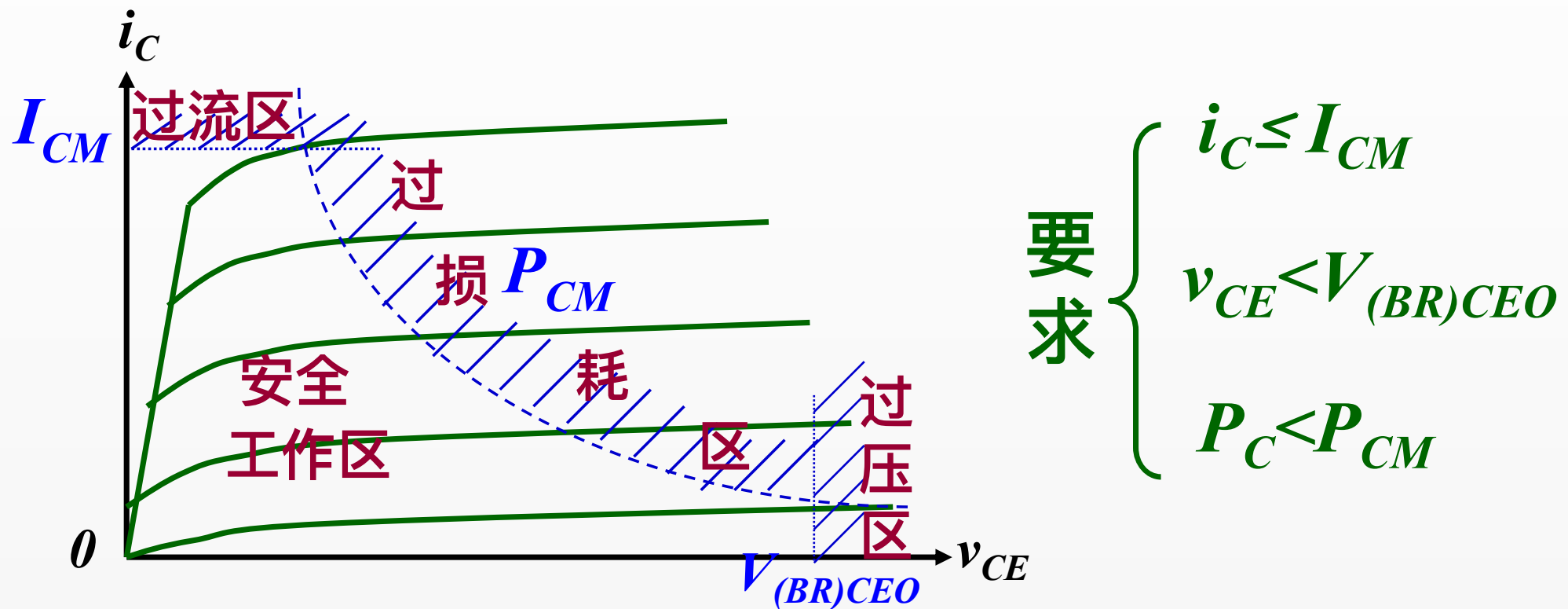
# 利用受控特性：实现信号放大



思考：实际放大电路能这样连接吗？缺少了什么？



# 三极管安全工作区



[-?]最大允许集电极电流 $I_{CM}$ ：(基于性能一致性考虑)

若 $I_C > I_{CM} \rightarrow$ 造成 $\beta \downarrow$ ,  $i_C$ 受 $v_{BE}$ 的控制作用减弱

[-?]反向击穿电压 $V_{(BR)CEO}$ ：(基于安全考虑)

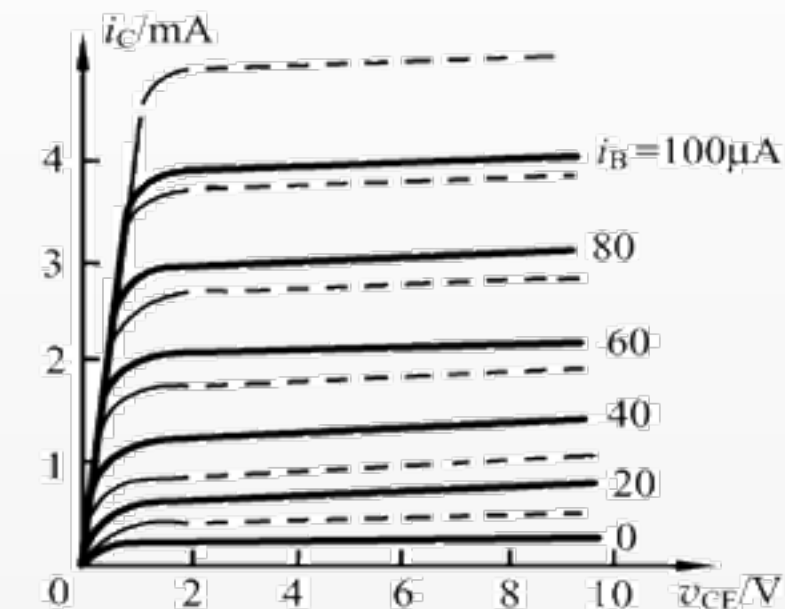
若 $v_{CE} > V_{(BR)CEO} \rightarrow$ 管子反向击穿

[-?]最大允许集电极耗散功率 $P_{CM}$ ：(基于安全考虑)

$P_C = i_C v_{CE}$ , 若 $P_C > P_{CM} \rightarrow$ 烧管

# 三极管参数的温度特性

温度升高时,  $V_{BE}$  将减小,  $I_{CBO}$ 、 $I_{CEO}$ 、 $\beta$  都将增大, 使输出特性曲线上移, 而各条曲线间的距离加大, 如图中的虚线所示。



温度对三极管输出特性的影响

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

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

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

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

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

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

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

温度对三极管的影响集中体现在对集电极电流的影响。在设计电路时若使集电极电流稳定, 电路则基本稳定。

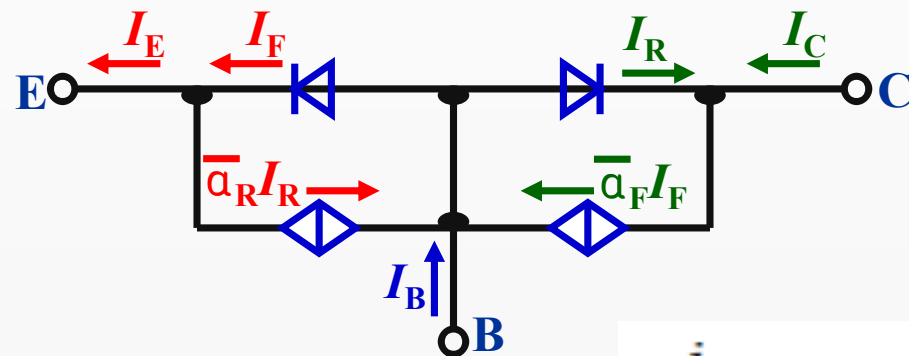
## 2.1.3 三极管的特性模型 (包括应用举例、仿真模型基础)

### 一. 三极管的数学模型 (指数模型, 处于放大区时的伏安关系式): 了解

$$i_C \approx \alpha i_E = \alpha I_{EBS} (e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1) \approx \alpha I_{EBS} e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

### 二. 埃伯尔斯—莫尔模型

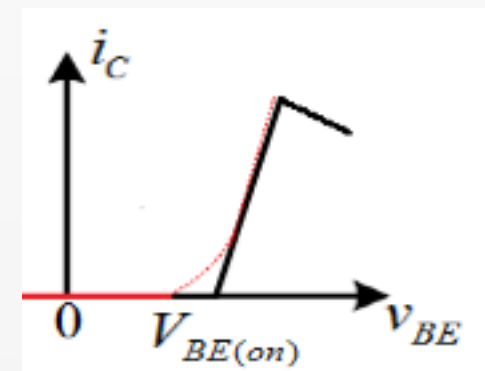
(用于计算机辅助分析: 了解)  
它适用于任何(除击穿外)工作模式。



### 三. 曲线模型 (图解法分析)

它适用于任何工作模式。

输入特性曲线  
输出特性曲线  
转移特性曲线

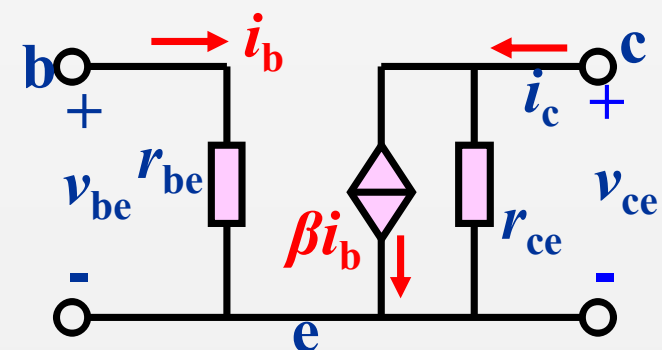


### 四. 直流简化电路模型: 放大模型 饱和模型 截止模型

(用于等效电路分析)

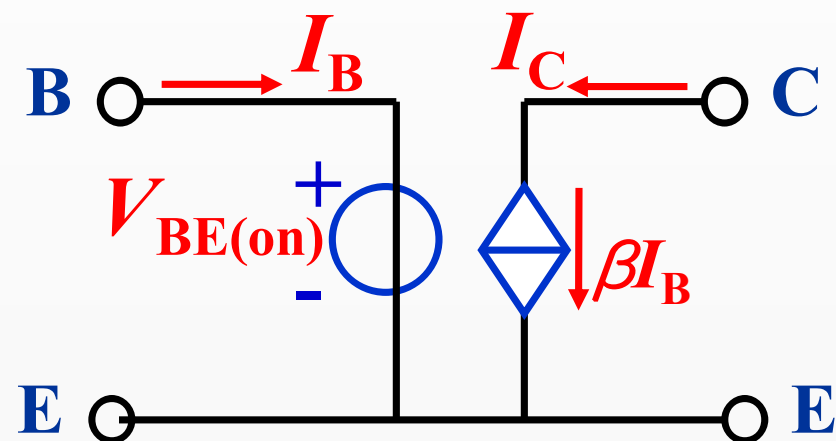
### 五. 小信号等效模型 (用于等效电路分析)

它适用于放大模式且小信号情况



# 三极管的直流简化电路模型

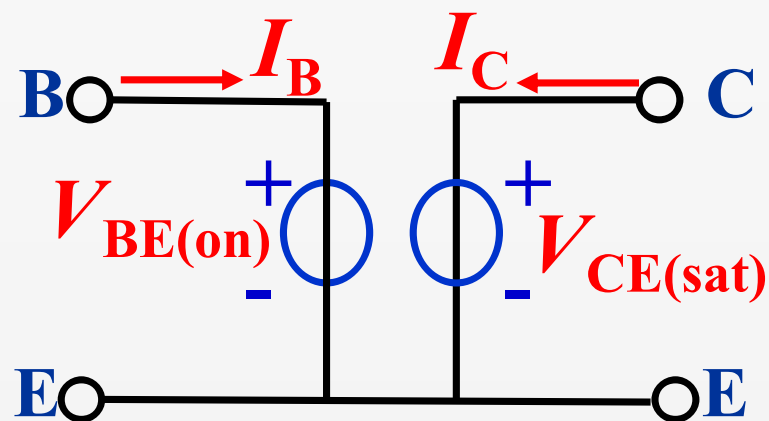
## 放大状态的直流简化电路模型



$V_{BE(on)}$  为发射结导通电压，  
工程上一般取：

硅管  $V_{BE(on)} = 0.7V$   
锗管  $V_{BE(on)} = 0.2V$

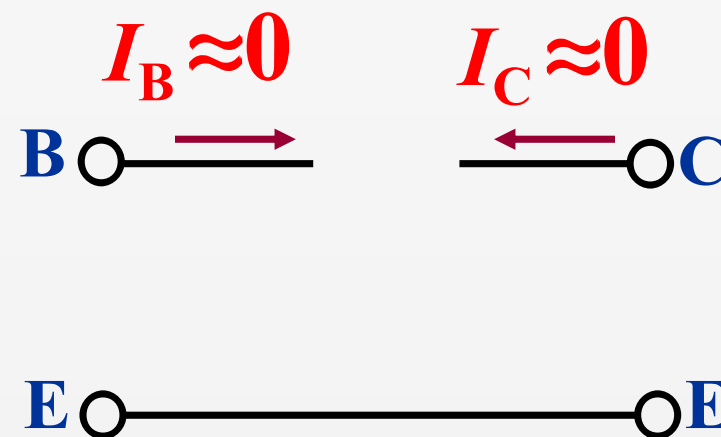
## 饱和状态下的简化电路模型：



通常，饱和压降  $V_{CE(sat)}$ ：

硅管  $V_{CE(sat)} \approx 0.3V$   
锗管  $V_{CE(sat)} \approx 0.1V$

## 截止状态下的简化电路模型：





**例子** 电路如图，已知 $V_{BE(on)}=0.7V$ ， $V_{CE(sat)}=0.3V$ ， $\beta=30$ ，  
试判断三极管工作状态，并计算 $V_C$ 。

**解：** 假设T工作在放大模式

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BE(on)}}{R_B} = 53 \mu A$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 1.59 mA$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} R_C = 4.41 V$$

因 $V_{CEQ} > 0.3V$ ，三极管工作在**放大模式**。  $V_C = V_{CEQ} = 4.41V$

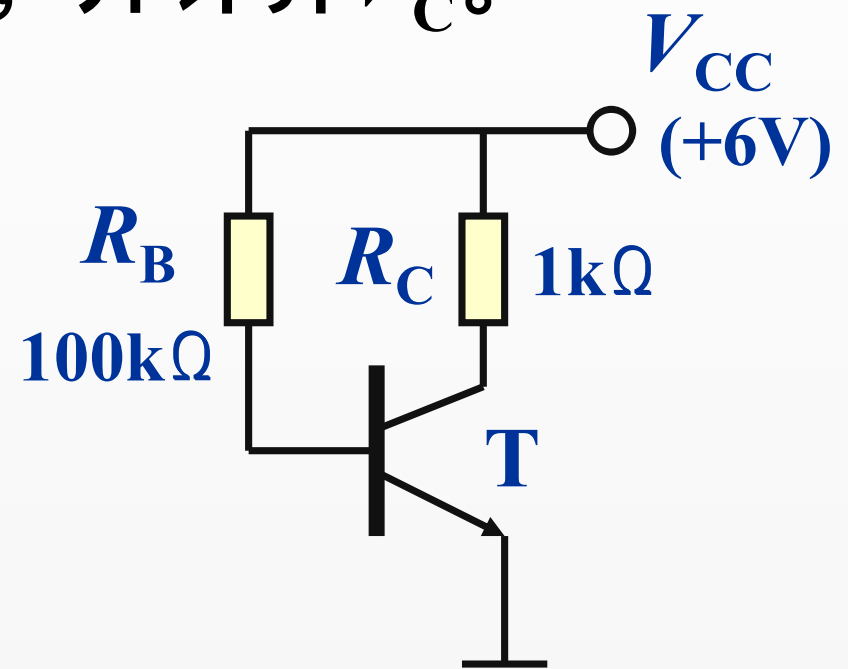
**(2)若将电路中的电阻 $R_B$  改为 $10k\Omega$ 呢？**

假设T工作在放大模式

$$\text{得： } I_{BQ} = 530 \mu A, \quad I_{CQ} = 15.9 mA, \quad V_{CEQ} = -9.9 V$$

因 $V_{CEQ} < 0.3V$ ，三极管工作在**饱和模式**。  $V_C = V_{CES} = 0.3V$

$$\text{实际得： } I_{BQ} = 530 \mu A, \quad I_{CQ} = (V_{CC} - V_{CES}) / R_C = 5.7 mA$$



# □ 工程近似法——估算法(以NPN管为例)

## 分析步骤:

②确定三极管工作模式。

只要  $V_{BE} \leq V_{BE(on)}$  (发射结反偏)  $\Rightarrow$  截止模式

若  $V_{BE} \geq V_{BE(on)}$   $\Rightarrow$  发射结正偏  $\left\{ \begin{array}{l} \text{集电结正偏: 饱和} \\ \text{集电结反偏: 放大} \end{array} \right.$

假定工作于放大模式, 估算  $V_{CE}$ :

若  $V_{CE} > V_{CES}$   $\Rightarrow$  放大模式

若  $V_{CE} < V_{CES}$   $\Rightarrow$  饱和模式

③用相应简化电路模型替代三极管。

④分析计算各电量。

# 三极管部分总结及作业题

## ► 总结



1、三极管的类型及电路符号：按结构不同分为NPN和PNP两种

2、三极管的正常工作状态及其外部条件：

基极电位处于中间，b、e间压降小 $\approx V_{BE(on)}$ ，b、c间反偏压降大

发射结**正偏**，集电结**正偏**：饱和状态

发射结**正偏**，集电结**反偏**：放大状态

发射结**反偏**，集电结**反偏**：截止状态

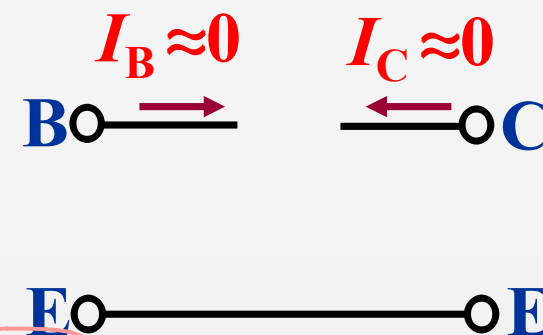
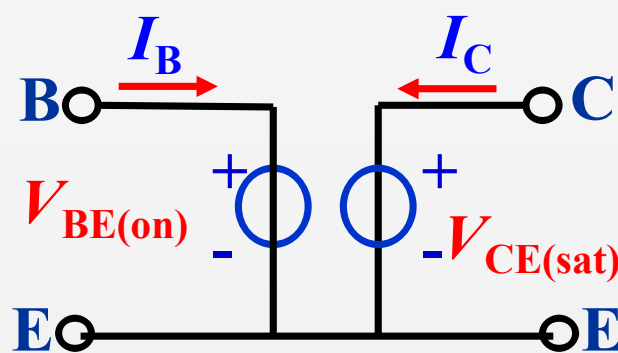
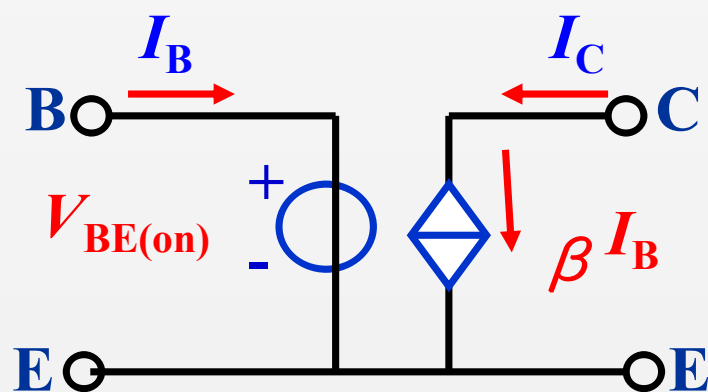
对NPN管有： $V_e < V_b < V_c$

对PNP管有： $V_e > V_b > V_c$

放大时各极电流之间的关系有：

$$I_C \approx \alpha I_E < I_E \quad I_C \approx \beta I_B > I_B \quad I_E \approx (1 + \beta) I_B$$

3、三极管的工作状态不同其等效模型也不同：下面分别为放大、饱和、截止时的等效模型

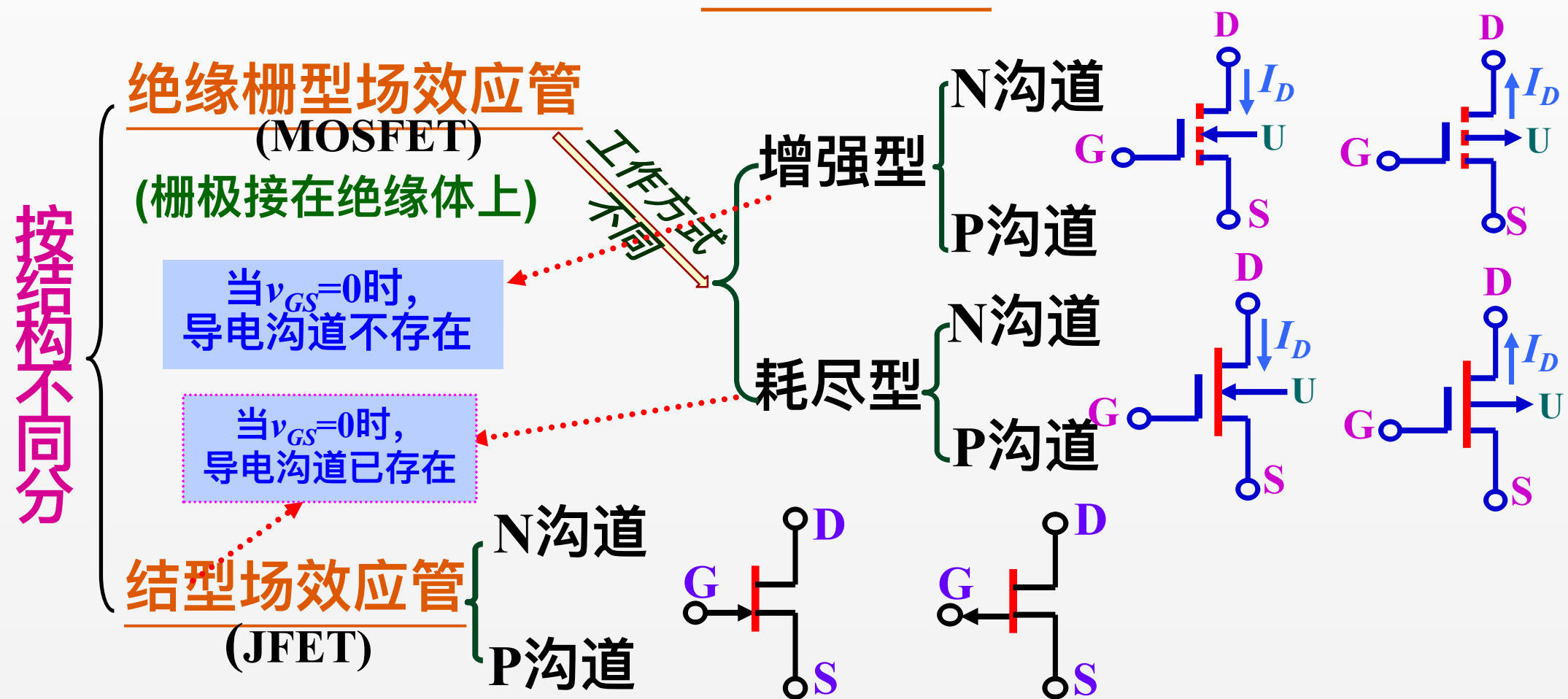


► 作业：P<sub>54</sub> 2-2、2-4；P<sub>55</sub> 2-5、2-6、2-7；P<sub>73</sub> 3-7(a)、(c)

## 2.2 场效应管(Field Effect Transistor)

场效应管也是一种具有正向受控作用（电压控制电流）的半导体器件。它体积小、工艺简单，器件特性便于控制，是目前制造大规模集成电路的主要有源器件。

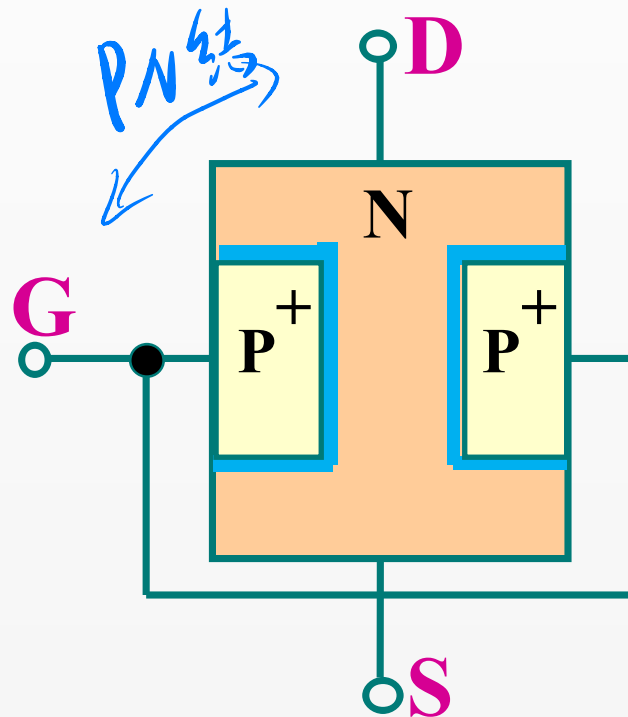
### 一、场效应管的种类及电路符号



# 结型场效应管的结构示意图及电路符号

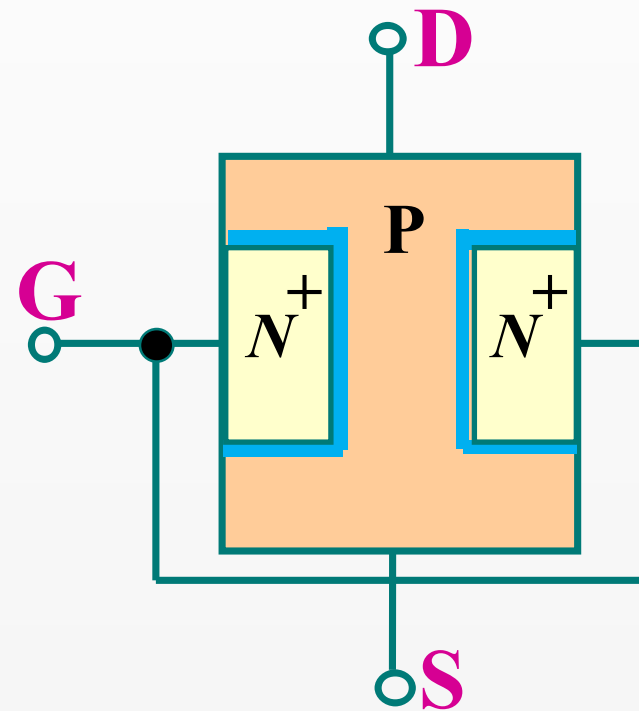
控制  $P_N$  反偏电压  
来控制沟道宽度

N沟道JFET

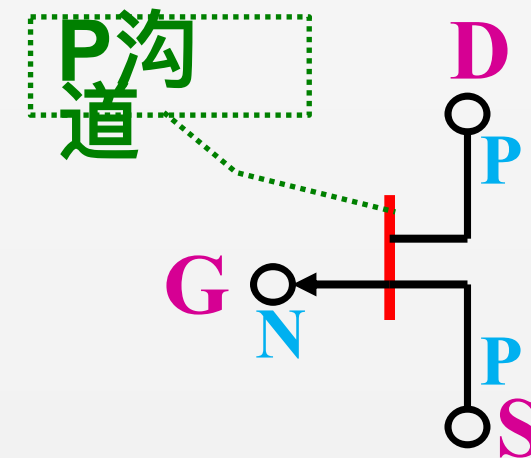
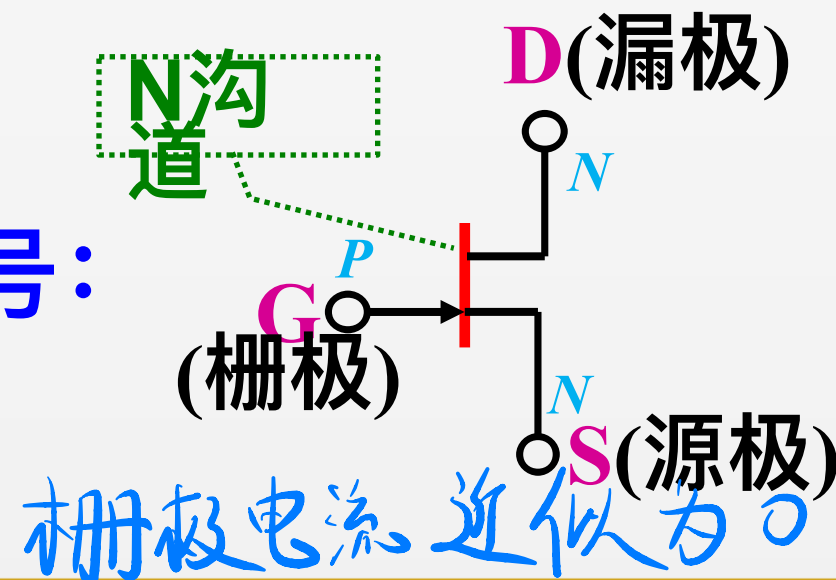


结构示意图:

P沟道JFET

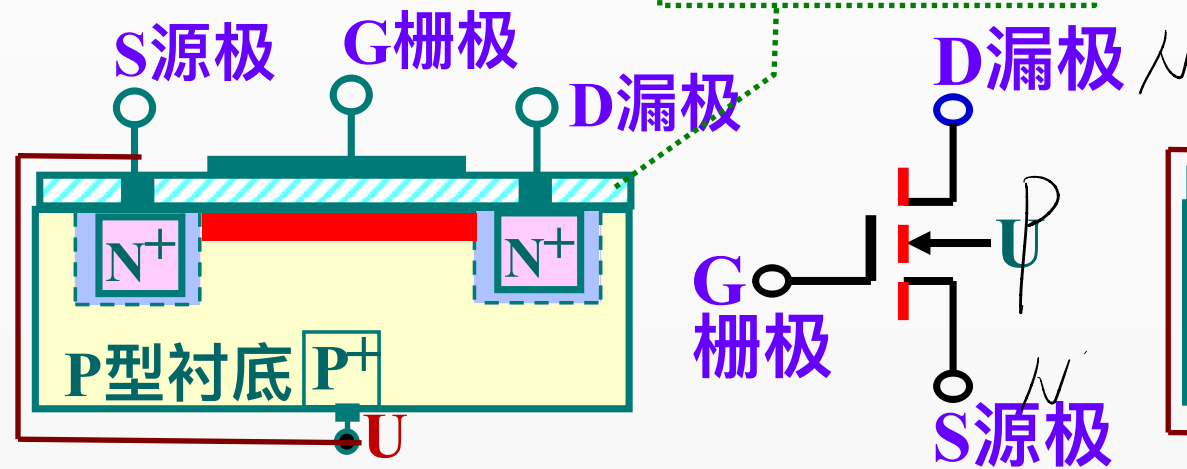


电路符号:

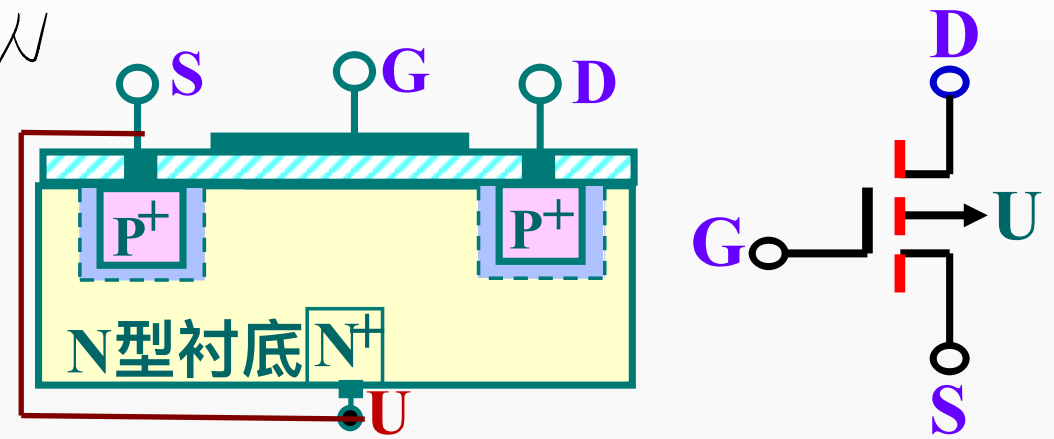


# 绝缘栅场效应管的结构示意图和电路符号

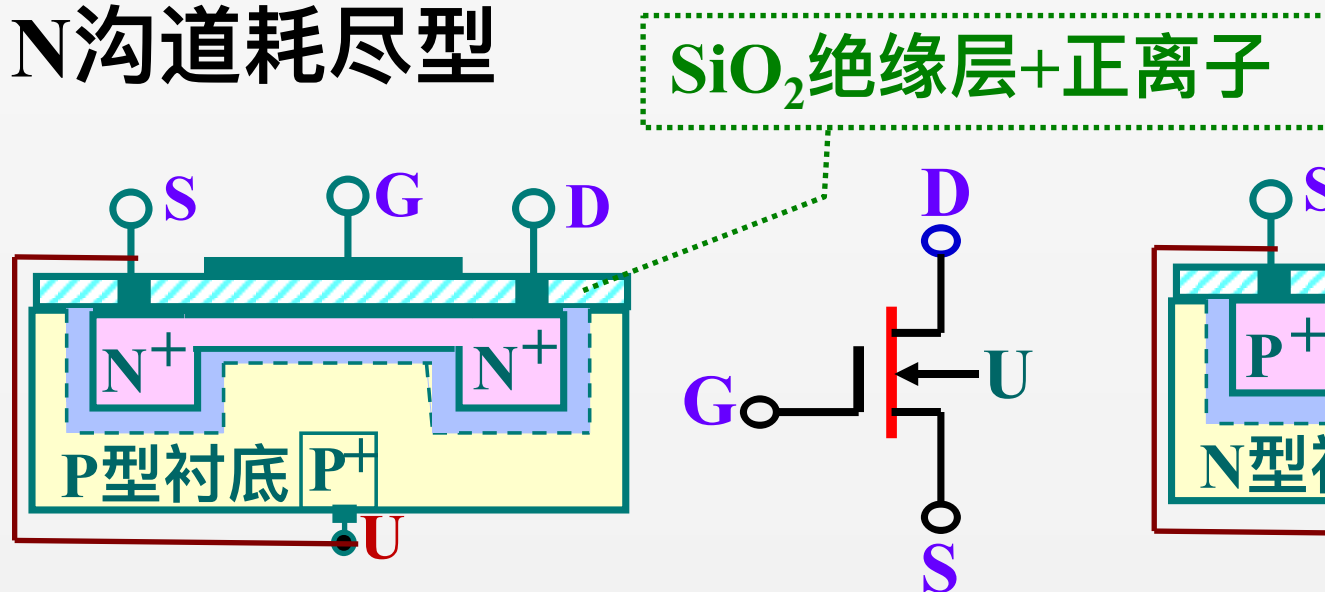
N沟道增强型



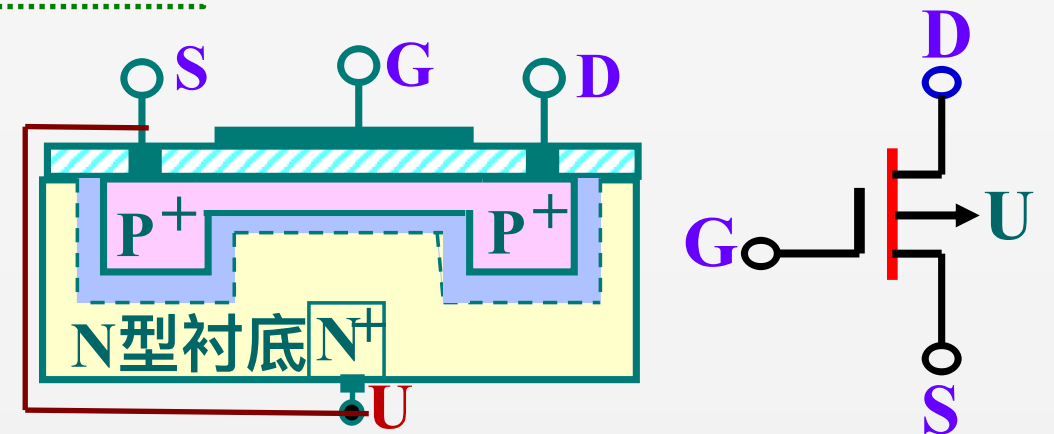
P沟道增强型



N沟道耗尽型



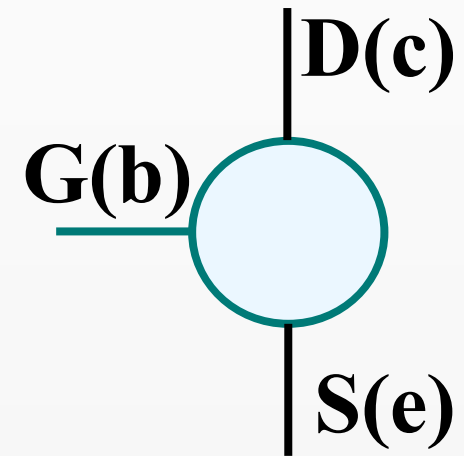
P沟道耗尽型



# 总结：

N沟道管子箭头是指向沟道，P沟道管子的箭头是背离沟道。

场效应管的电路符号可知：无论是JFET或是MOSFET，它都有三个电极：栅极G、源极S、漏极D。它们与三极管的三个电极一一对应（它们之间的对应关系除了电极有对应关系外，由它们构成的放大电路的特性也有对应关系）。



## 场效应管与三极管主要区别：

- 场效应管输入电阻远大于三极管输入电阻。
- 场效应管是单极型器件（三极管是双极型器件）。
- 场效应管受温度的影响小（只有多子漂移运动形成电流）
- 场效应管内部噪声低（只有多子漂移运动形成电流）

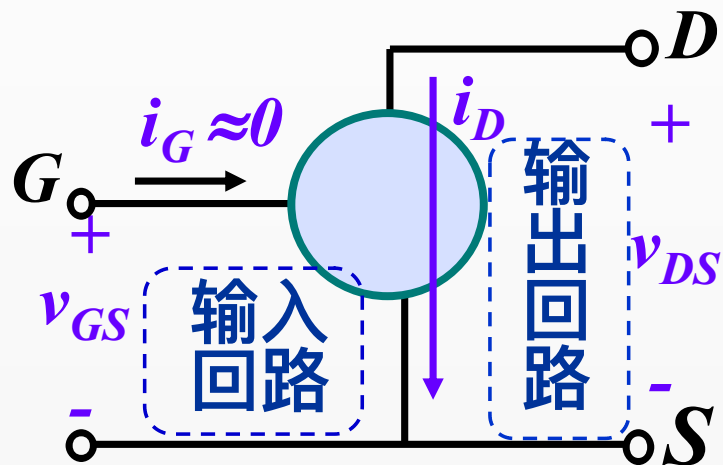


# 场效应管与三极管的比较

器件 比较项目	双极型晶体管	场效应晶体管
载流子	多子(扩散)、少子(漂移)同时参与导电 (故称双极型晶体管)	只多子(漂移)参与导电 (称单极型晶体管)
温度稳定性	较差	好
控制方式	电流控制 ( $i_B$ 控制 $i_C$ )	电压控制( $v_{GS}$ 控制 $i_D$ )
主要类型	NPN和PNP两种	N沟道和P沟道两种
放大参数	$\beta = 50 \sim 300$	$g_m = 1 \sim 20 \text{ mS}$
输入电阻	$10^2 \sim 10^4 \Omega$	$R_{GS}$ 很大, $10^9 \Omega$ 以上
输出电阻	$r_{ce}$ 很高	$r_{ds}$ 很高
制造工艺	较复杂	简单、成本低
对应电极	基极—栅极, 发射极—源极, 集电极—漏极	

## 二、场效应管的工作原理

JFET与MOSFET工作原理相似，都是利用电场效应来控制沟道电流的。



通过改变G、S电压 $v_{GS}$ ，来改变D、S间导电沟道的宽度和长度，从而改变沟道的电阻值，最终达到对沟道电流 $i_D$ 的控制作用。不同之处仅在于导电沟道形成的原理不同。

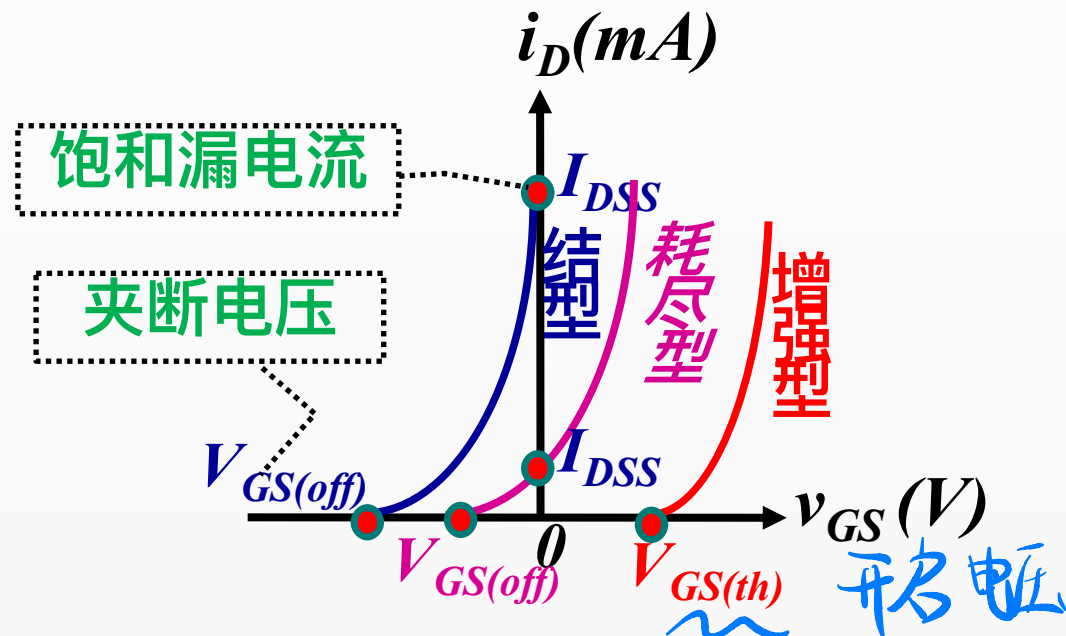
三、特性曲线

- 转移特性:  $i_D = f_{1E}(v_{GS}) \big|_{v_{DS} = \text{常数}}$
- 输出特性:  $i_D = f_{2E}(v_{DS}) \big|_{v_{GS} = \text{常数}}$

四、主要参数

五、使用注意事项

# 转移特性曲线 $\leftarrow i_D = f_{IE}(v_{GS}) \big|_{v_{DS}=\text{常数}}$ (以在饱和区的为例)



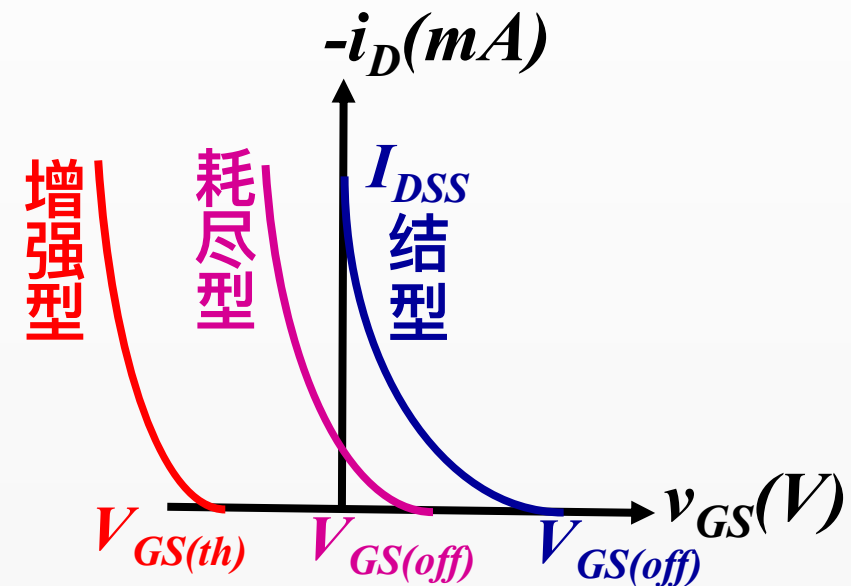
N沟道:  $v_{DS} > 0$

(增强型:  $v_{DS} > v_{GS} - v_{GS(th)}$ )

耗尽型:  $v_{DS} > v_{GS} - v_{GS(off)}$

耗尽型和结型管子在饱和区的转移特性关系:

$$I_D \approx I_{DSS} \left( 1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$



P沟道:  $v_{DS} < 0$

( $v_{DS} < v_{GS} - v_{GS(th)}$ )

增强型管子的转移特性关系:

反型层中的多子迁移率

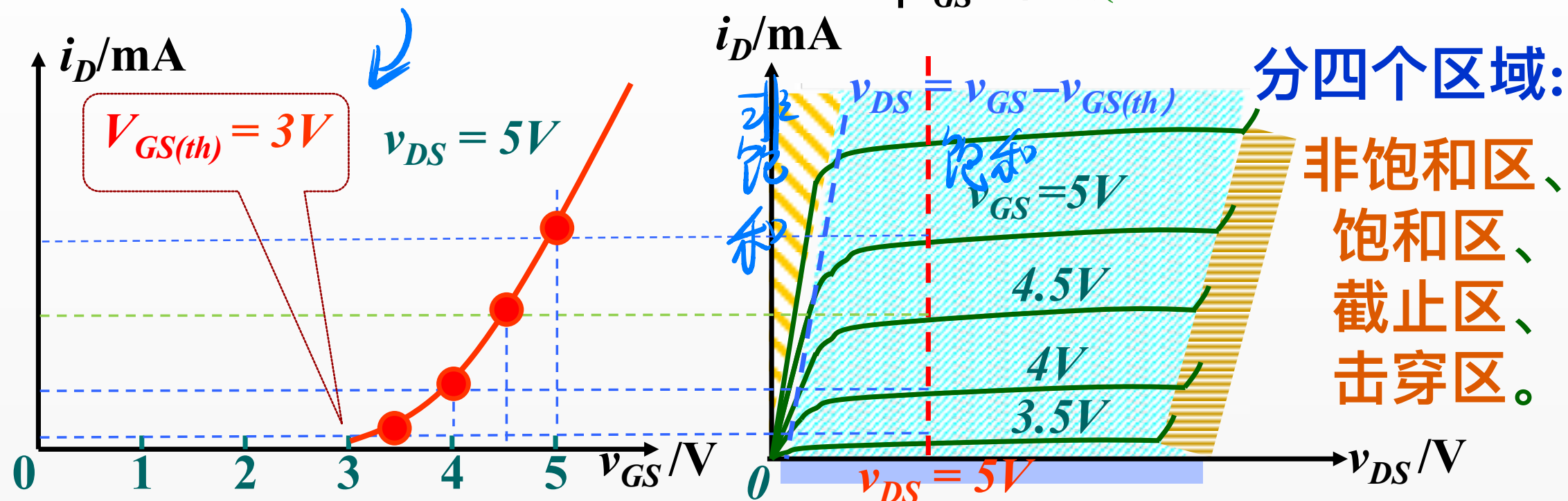
栅极氧化层单位面积电容

沟道宽度

$$i_D = \frac{\mu_n C_{OX} W}{2l} (v_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

沟道长度

# 输出特性曲线 $\leftarrow i_D = f_{IE}(v_{DS}) \big|_{v_{GS}=\text{常数}}$ (以N沟道EMOSFET为例)

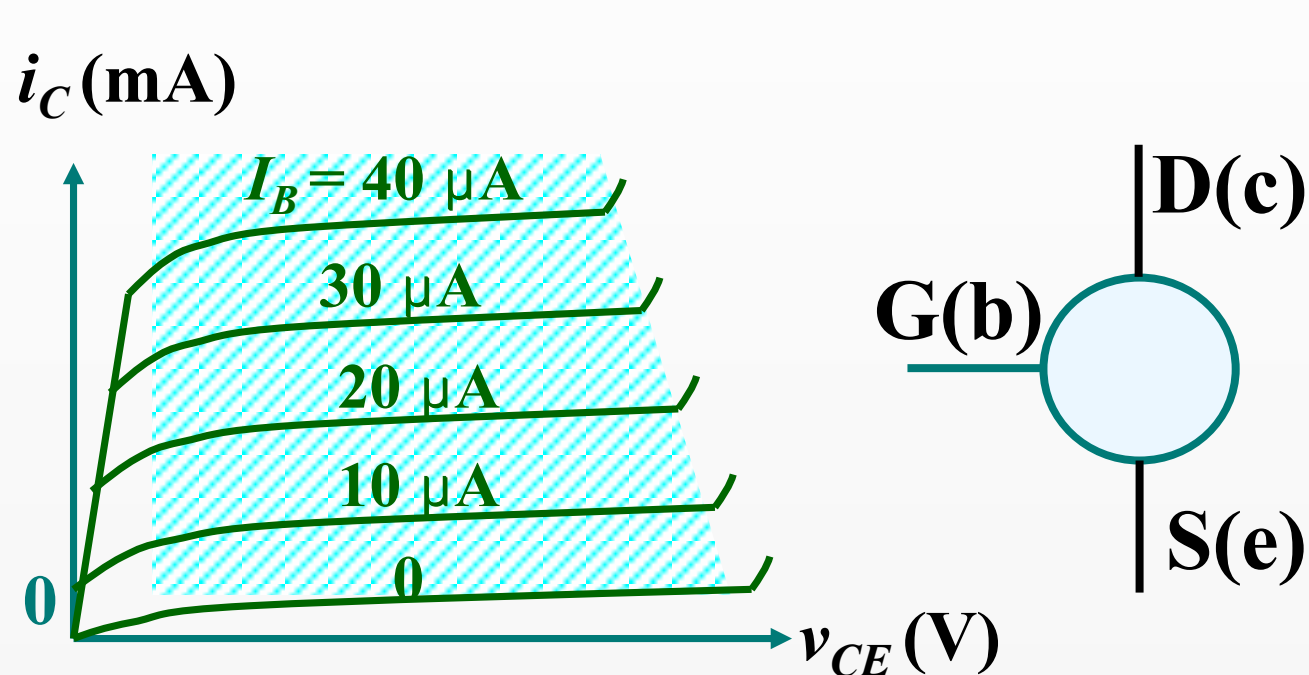


转移特性曲线反映  $v_{DS}=C$  时,  $v_{GS}$  对  $i_D$  的控制作用, 可由输出特性转换得到

- 非饱和区 (可变电阻区) { 条件:  $v_{GS} > V_{GS(th)}$ ,  $v_{DS} < v_{GS} - V_{GS(th)}$   
特点:  $i_D$  受  $v_{DS}$ 、 $v_{GS}$  控制,  $v_{GS}$  变, 斜率变, 电阻不同
- 饱和区 (恒流区) { 条件:  $v_{GS} > V_{GS(th)}$ ,  $v_{DS} > v_{GS} - V_{GS(th)}$   
特点:  $i_D$  受  $v_{GS}$  控制 (受控特性), 与  $v_{DS}$  几乎无关 (恒流特性)
- 截止区 { 条件:  $v_{GS} < V_{GS(th)}$   
特点:  $i_D = 0$
- 击穿区: 反向击穿电压  $V_{DS(BR)}$

与三极管对比

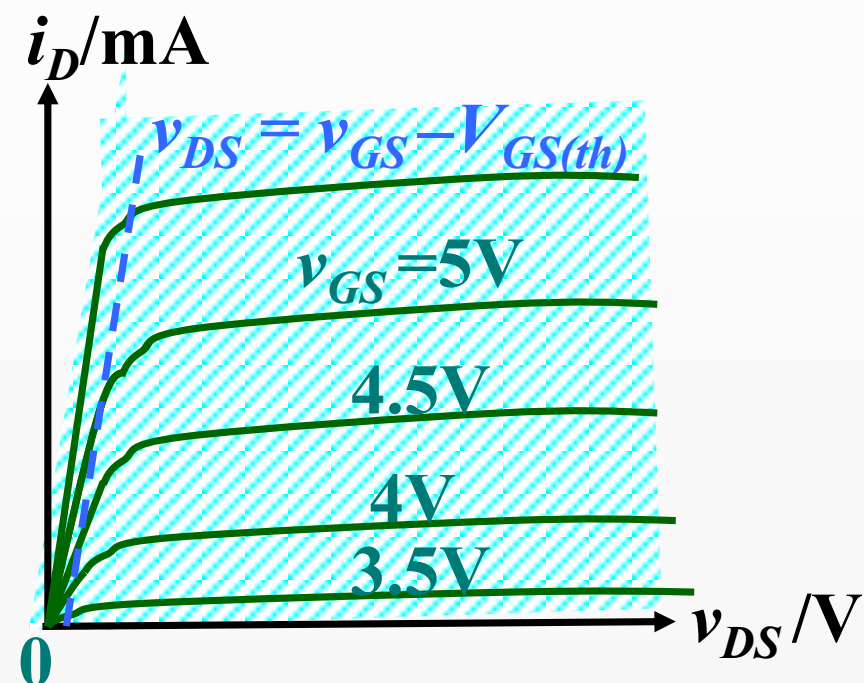
# 三极管在放大区、场效应管在饱和区



## 放大区的特点:

$i_C$  受  $i_B$  控制, 与  $v_{CE}$  几乎无关  
(受控特性、恒流特性)

构成放大电路



## 饱和区的特点:

$i_D$  受  $v_{GS}$  控制, 与  $v_{DS}$  近似无关  
(受控特性、恒流特性)

构成恒流源电路

# 四、场效应管的主要参数

## (一) 直流参数

1. 开启电压  $V_{GS(th)}$  —— 增强型MOSFET
2. 夹断电压  $V_{GS(off)}$  —— 耗尽型MOSFET和JFET
3. 饱和电流  $I_{DSS}$  —— 耗尽型管参数，对应  $v_{GS}=0$  时的漏极电流
4. 直流输入电阻  $R_{GS(DC)}$

## (二) 交流参数

极间电容： $C_{GS}$ 、 $C_{GD}$  (1~3pF)、 $C_{DS}$  (0.1~1pF)

低频跨导  $g_m$ ：用来反映栅源电压  $v_{GS}$  对漏极电流  $i_D$  的控制能力

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta v_{GS}} \right|_{v_{DS}=\text{常数}} \begin{cases} \approx 2\sqrt{I_{DQ}I_{DSS}} & (\text{增强型}) \\ \approx -\frac{2I_{DSS}}{V_{GS(off)}} \sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DSS}}} & (\text{耗尽型和结型}) \end{cases}$$

## ❖ 极限参数

❑ 最大漏极电流  $I_{DM}$ ；最大耗散功率  $P_{DM}$

❑ 漏源击穿电压  $V_{DS(BR)}$ ；栅源击穿电压  $V_{GS(BR)}$

## 五、场效应管的使用注意事项

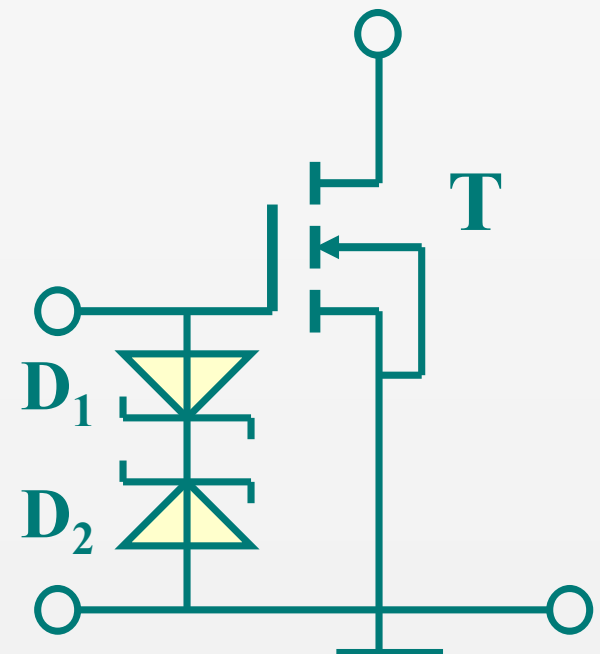
由于MOS管 $C_{OX}$ 很小，因此当带电物体（或人）靠近金属栅极时，感生电荷在 $SiO_2$ 绝缘层中将产生很大的电压 $v_{GS}(=Q/C_{OX})$ ，使绝缘层击穿，造成MOS管永久性损坏。

### MOS管保护措施：

分立的MOS管：各极引线短接、烙铁外壳接地。

### MOS集成电路：

$D_1 D_2$ 一方面限制 $V_{GS}$ 间最大电压，同时对感生电荷起旁路作用。

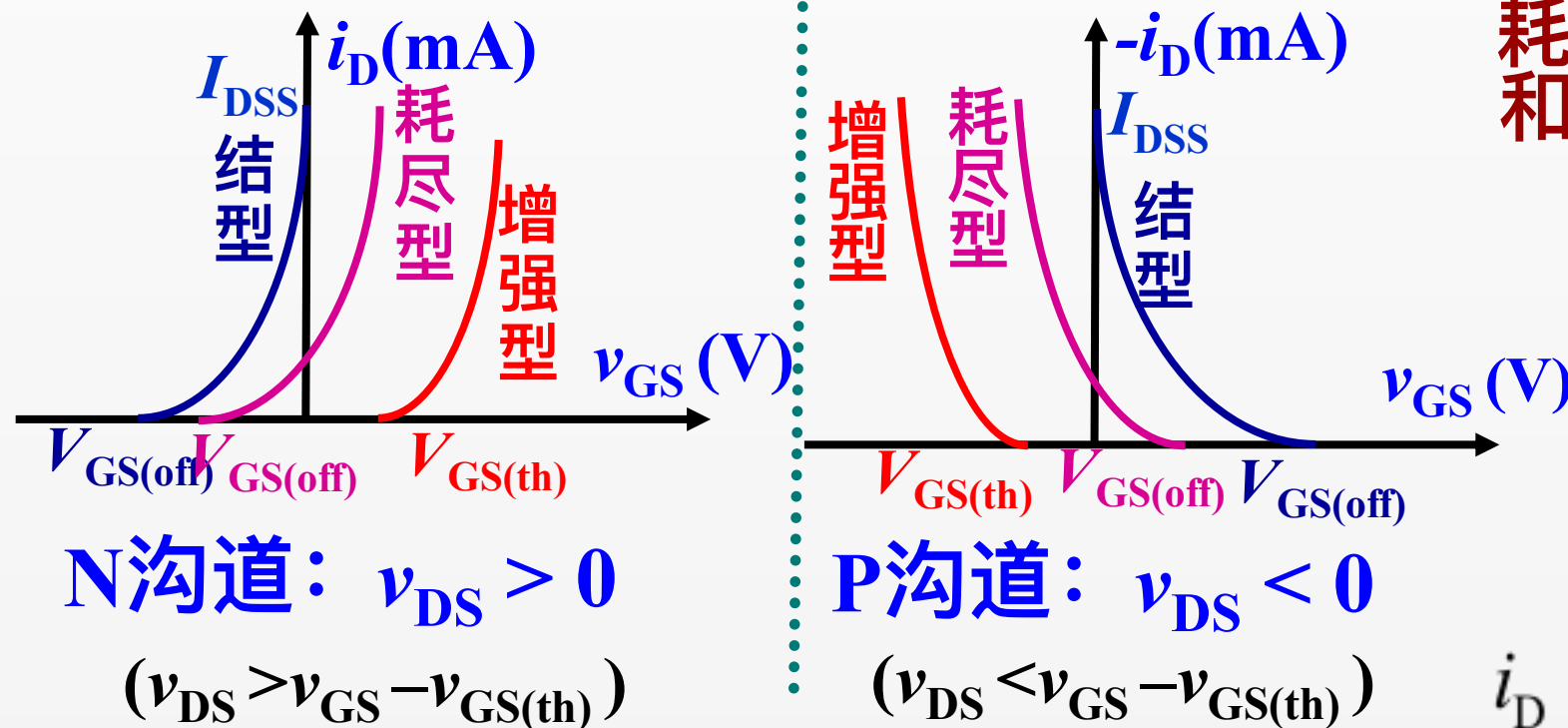




# 场效应管部分总结及作业题

## ► 总结

1. 类型:按结构不同分为结型和绝缘栅型(六种电路符号)
2. 工作于饱和区时的转移特性曲线及条件:



耗尽型和结型管子在饱和区的转移特性关系:

$$I_D \approx I_{DSS} \left( 1 - \frac{v_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$$

增强型管子在饱和区的转移特性关系:

$$i_D = \frac{\mu_n C_{OX} W}{2l} (v_{GS} - V_{GS(th)})^2$$

3. 在饱和区时具有:恒流特性和受控特性

4. 作于饱和区时的等效电路:

► 作业: P<sub>55</sub> 2-11; P<sub>56</sub> 2-12、2-13;

