

基础电路与电子学

主讲：陈开志

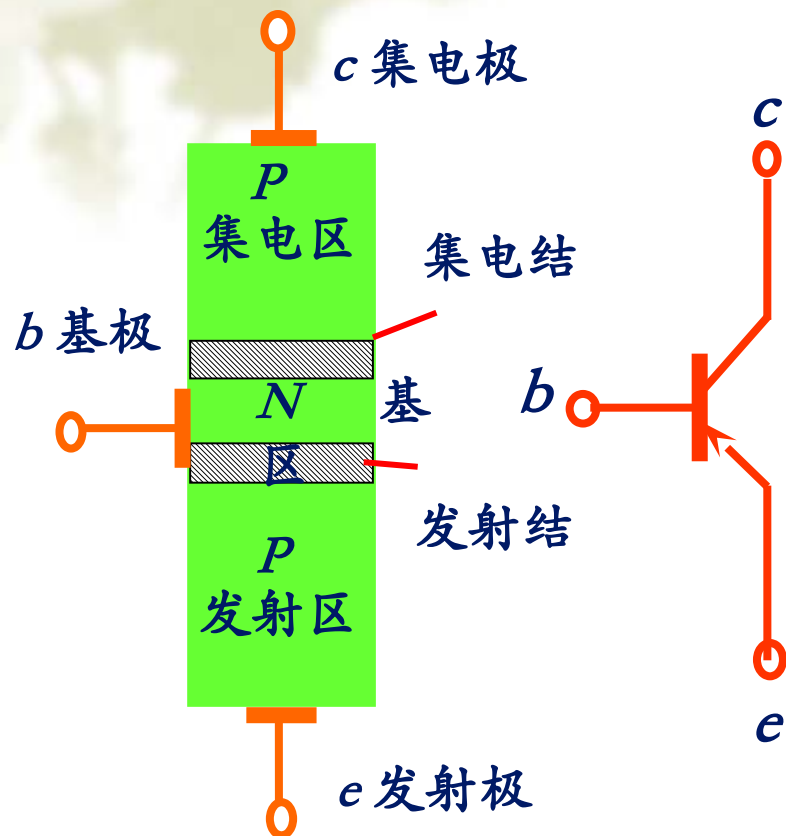
办公室：学院 2 号楼 304

Email: ckz@fzu.edu.cn

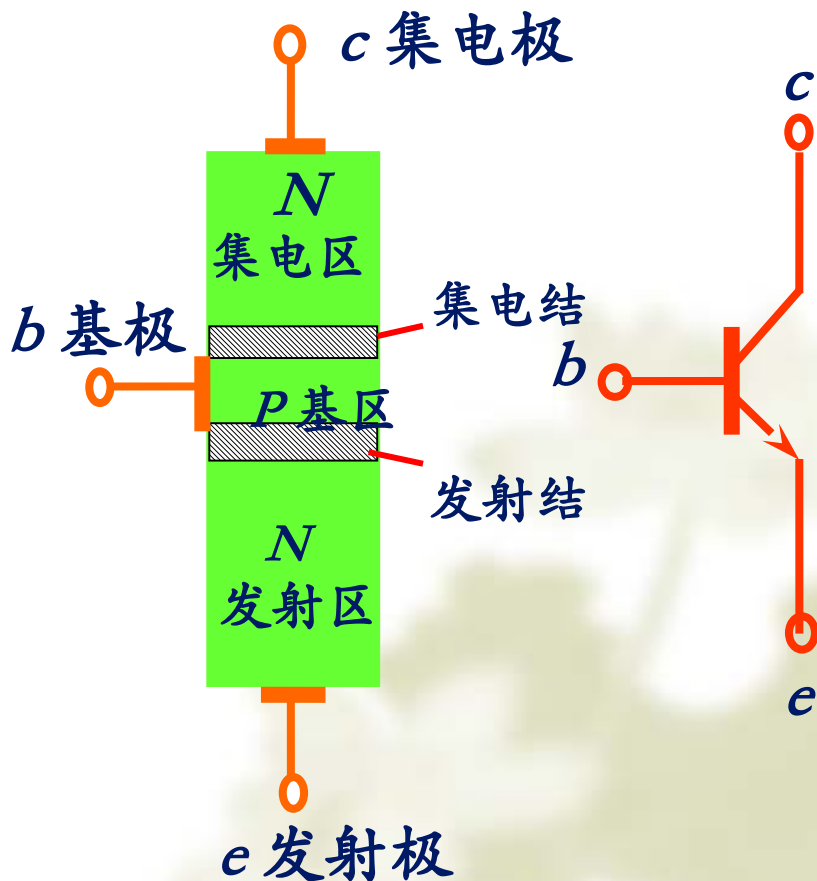
QQ 群： 812010686

(1) 半导体三极管结构

半导体三极管可以简称为“晶体管”，两个背靠背的 PN 结，三极管可以分为 **PNP** 型和 **NPN** 型两种。



(a) PNP 型



(b) NPN 型

(1) 半导体三极管结构

三极管的作用：电流放大作用。

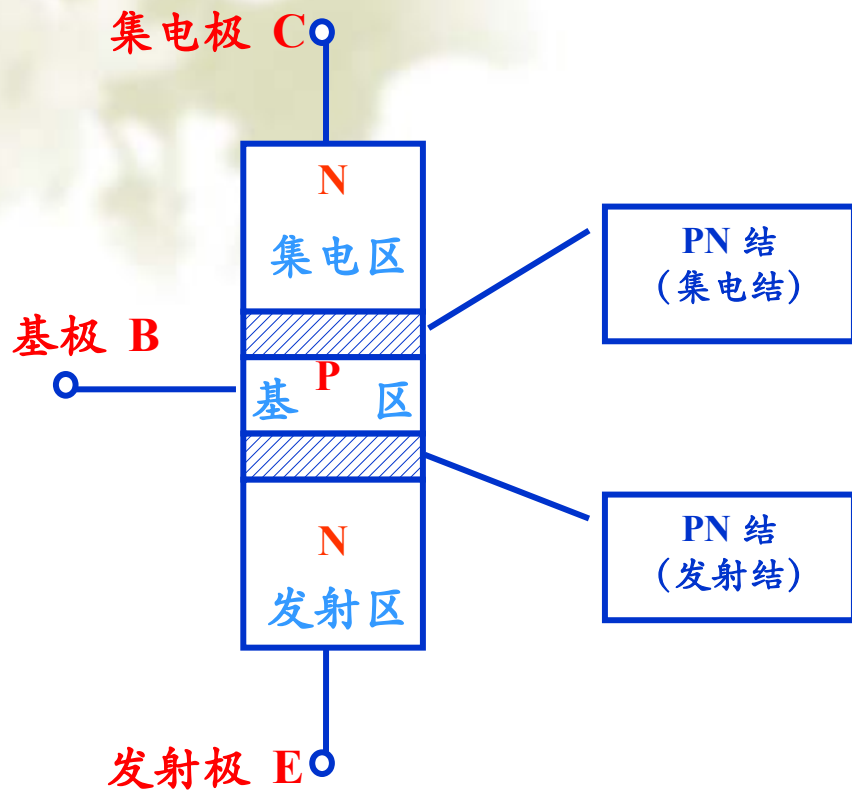
放大内部条件：

- ①三个区所掺杂的杂质浓度并不相同，发射区所掺杂的杂质浓度大大高于集电区；发射区 \gg 集电区 \gg 基区
- ②基区所掺杂的杂质浓度非常低，且基区制作的非常薄。

外部条件：外加电压发射结正偏，集电结反偏。

(2) 半导体放大作用

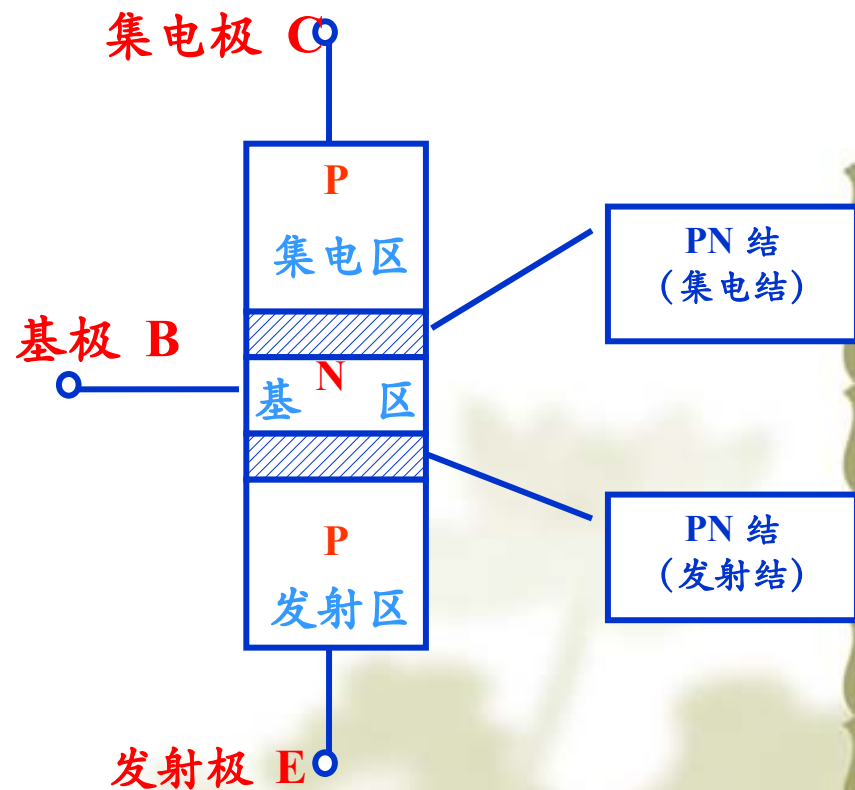
NPN 型三极管



$$V_C > V_B > V_E$$

电流放大作用

PNP 型三极管



$$V_E > V_B > V_C$$

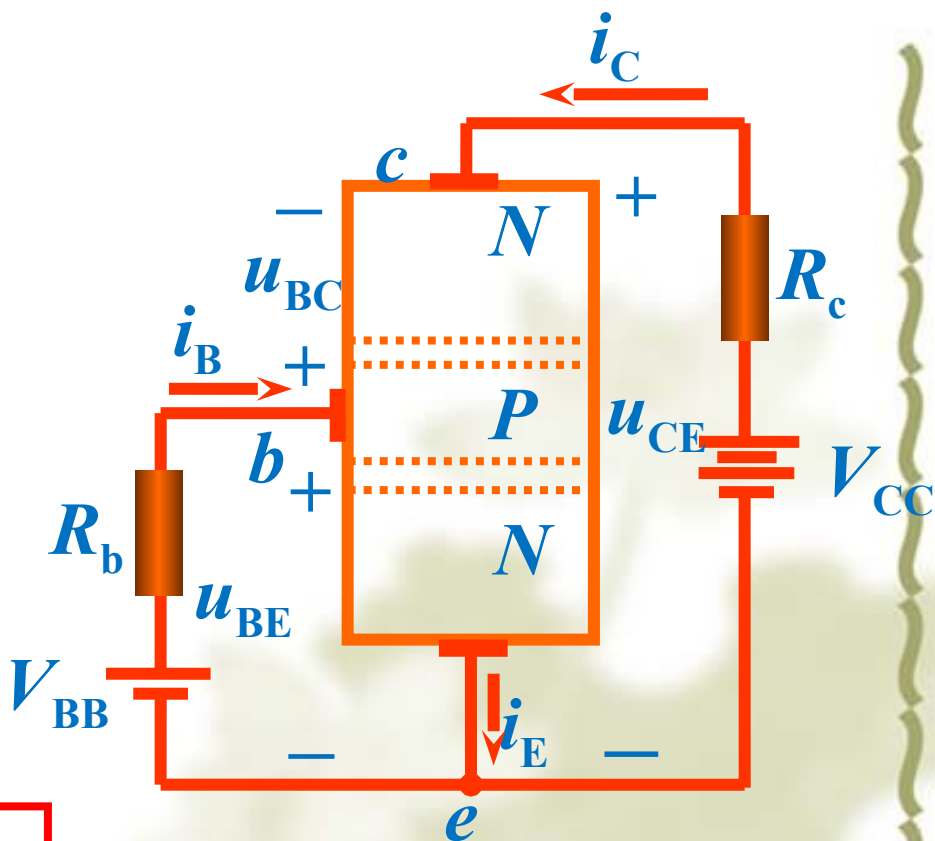
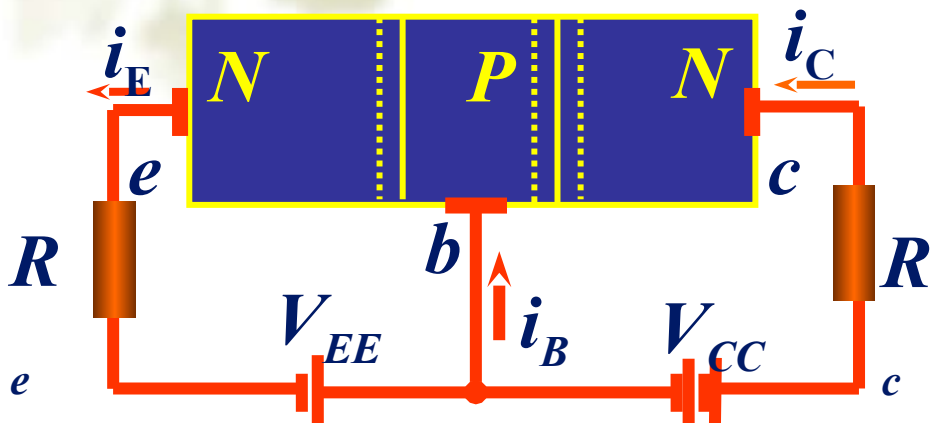
发射结正偏，集电结反偏

(2) 半导体放大作用

放大电路两种接法：发射结正偏，集电结反偏

1 共基接法

2 共射接法。 $V_{CC} > V_{BB}$



电流放大作用 $i_C = \beta i_B$

(2) 半导体放大作用

一、NPN 型三极管的电流放大原理

发射结正偏，集电结反偏

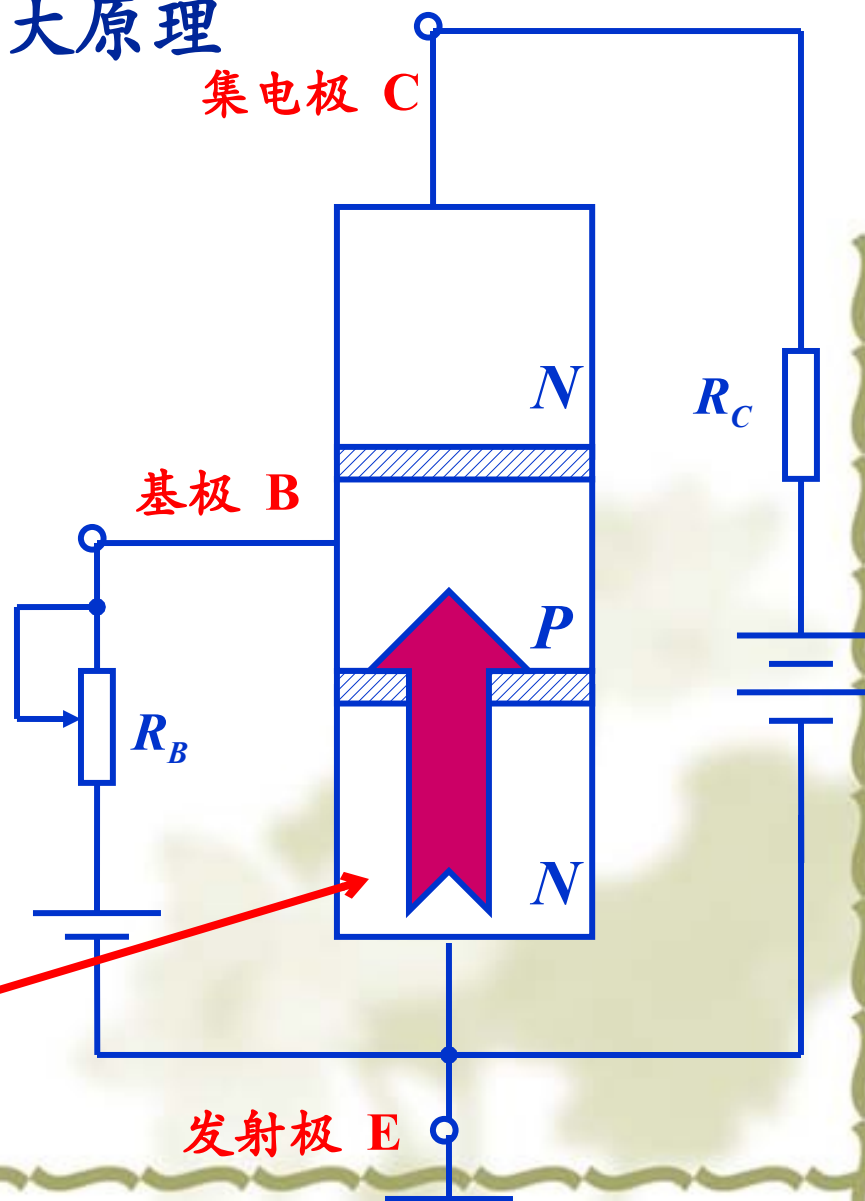


$$V_C > V_B > V_E$$

① 发射结正偏时，PN 结的内部以多子的扩散运动为主。基区所掺杂的杂质浓度远远低于发射区所掺杂的浓度，扩散的多子以 N 区的自由电子为主。

∴ 发射区会发射大量的多子

(自由电子) 到基区。



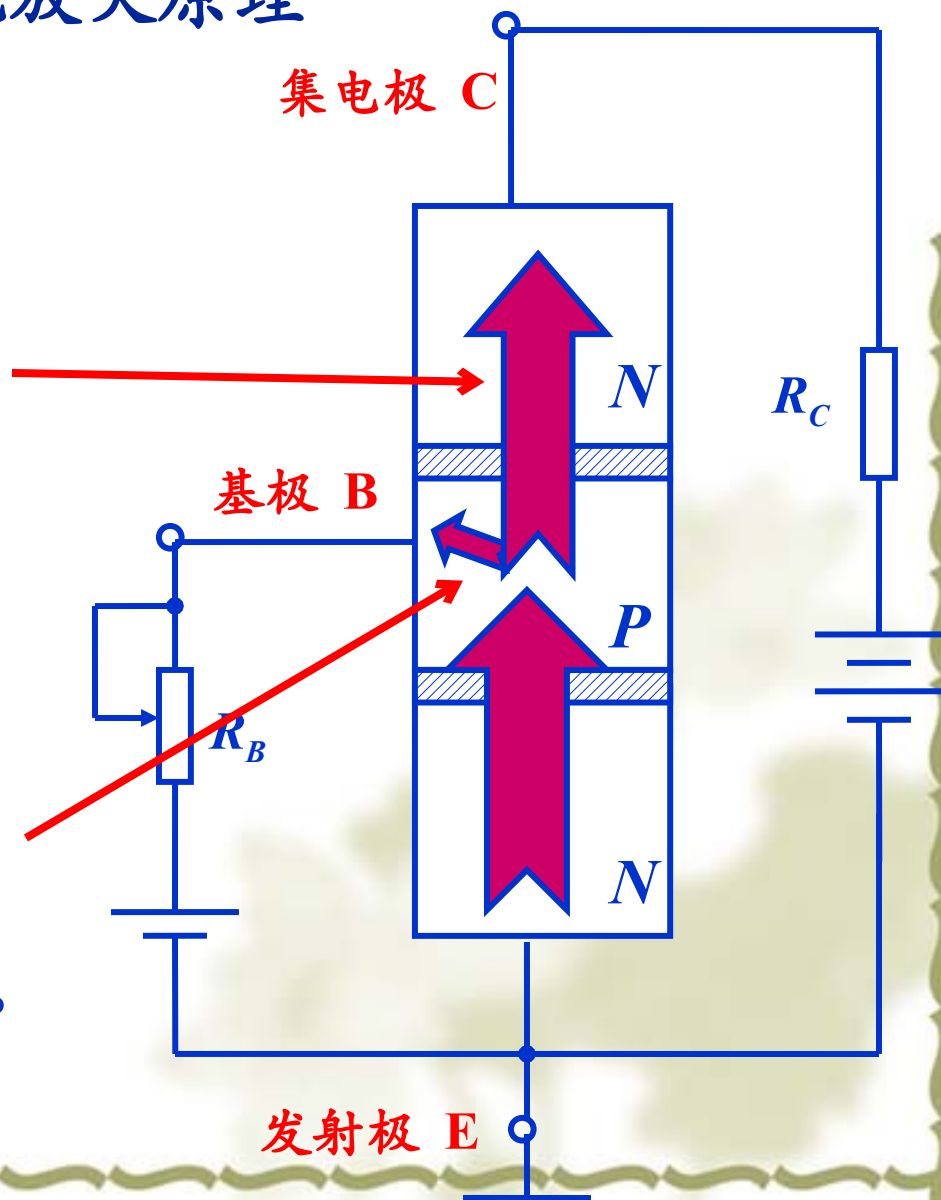
(2) 半导体放大作用

一、NPN 型三极管的电流放大原理

② 当集电结反偏时，PN 结内部以少子的漂移运动为主。

发射区发射来的大量的自由电子到达基区后，而会在集电结反偏电压的作用下，被收集到集电区。

在运动的过程中，会有少量的自由电子和基区的空穴相复合。

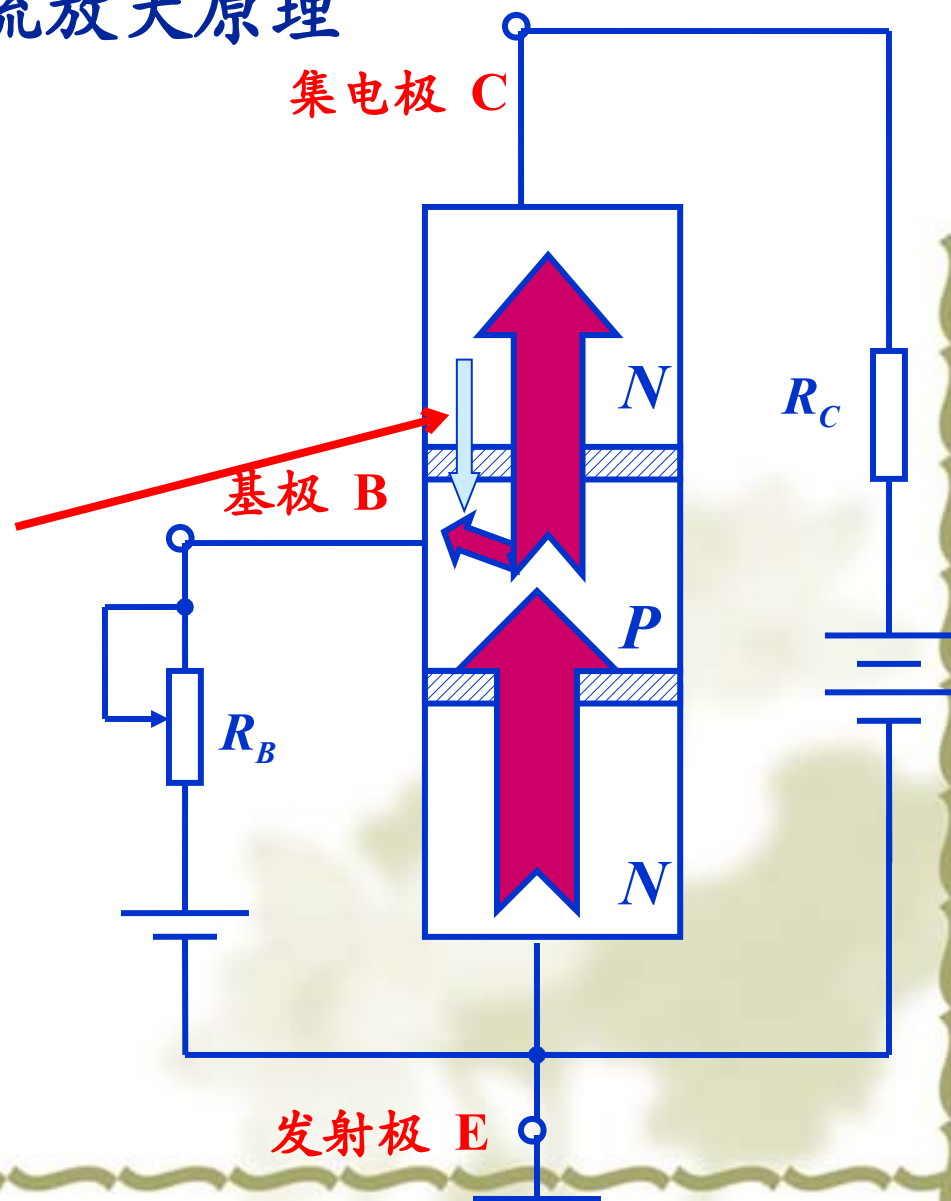


(2) 半导体放大作用

一、NPN 型三极管的电流放大原理

因为基区非常薄，所掺杂的杂质浓度非常低，所以基区所漂移的少子可以忽略不计。

由于集电结的反偏，PN结的内部以少子的漂移运动为主所以集电区的少子（空穴）会漂移到基区。



(2) 半导体放大作用

一、NPN 型三极管的电流放大原理

发射结正偏，集电结反偏

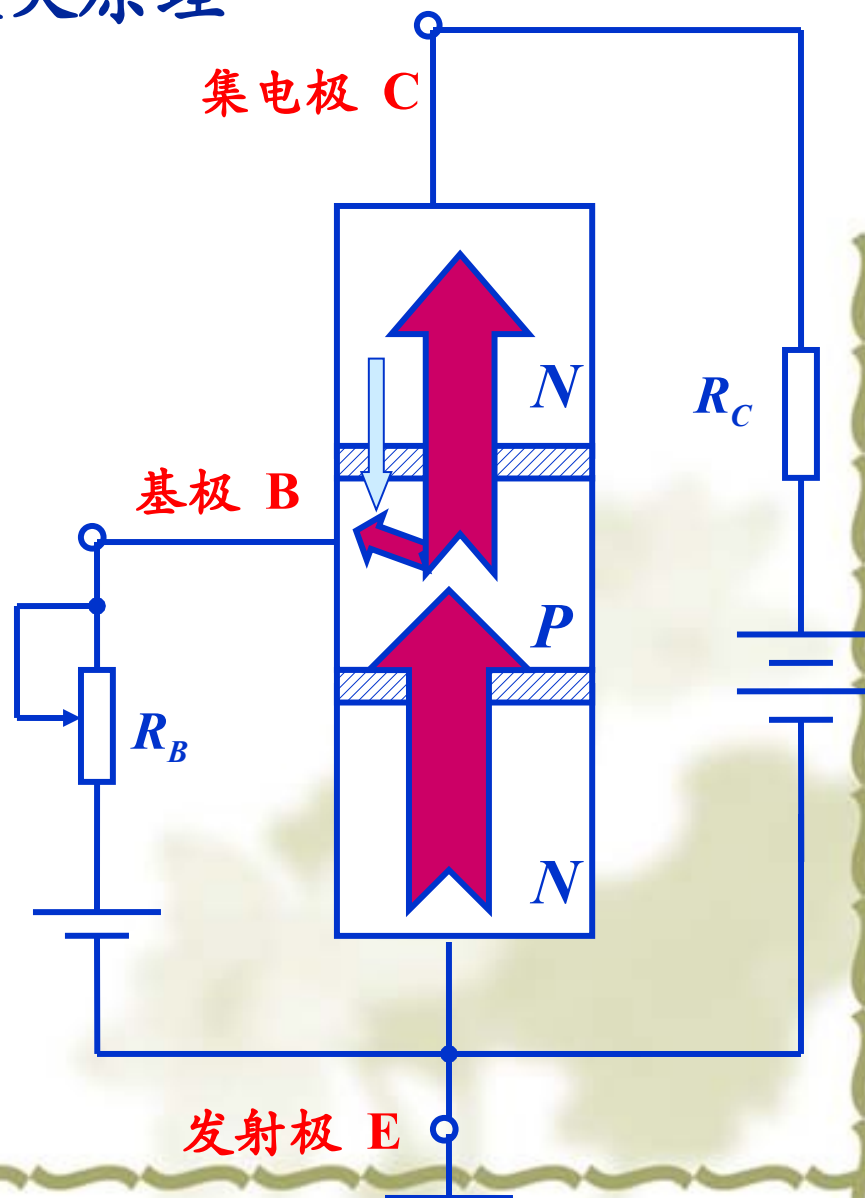


$$V_C > V_B > V_E$$

发射区发射大量的自由
电子，经过基区，被收
集到集电区

集电区会漂移少量的空
穴到基区

载
流
子
运
动



(2) 半导体放大作用

一、NPN 型三极管的电流放大原理

电流关系：

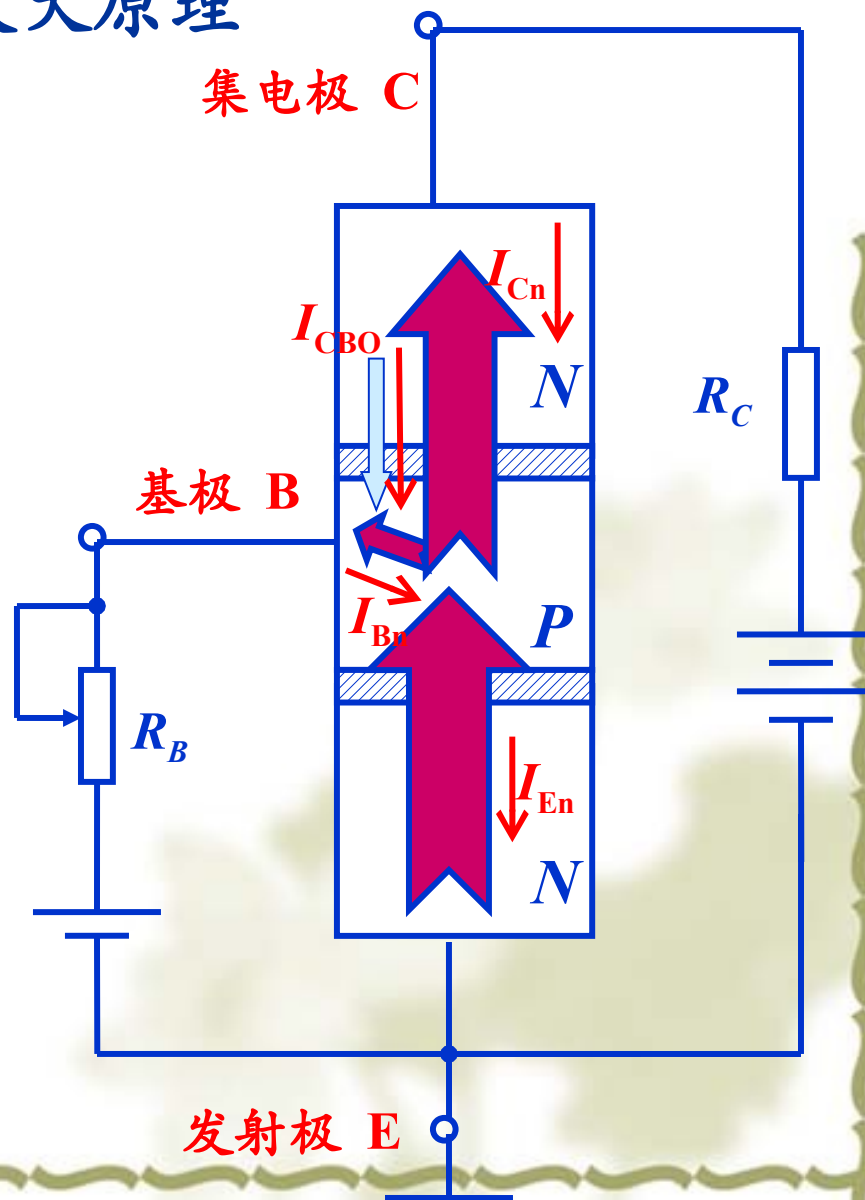
$$1、I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

$$2、I_{En} \approx I_{Cn} \quad I_{Cn} \gg I_{Bn}$$

$$3、\frac{I_{Cn}}{I_{Bn}} = \overline{\beta} \gg 1$$

直流电流放大倍数

当三极管制造好后， $\overline{\beta}$
随之固定，是一个常数。



(2) 半导体放大作用

一、NPN 型三极管的电流放大原理

电流关系：

$$1、I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

$$2、I_{En} \approx I_{Cn} \quad I_{Cn} \gg I_{Bn}$$

$$3、\frac{I_{Cn}}{I_{Bn}} = \beta \gg 1$$

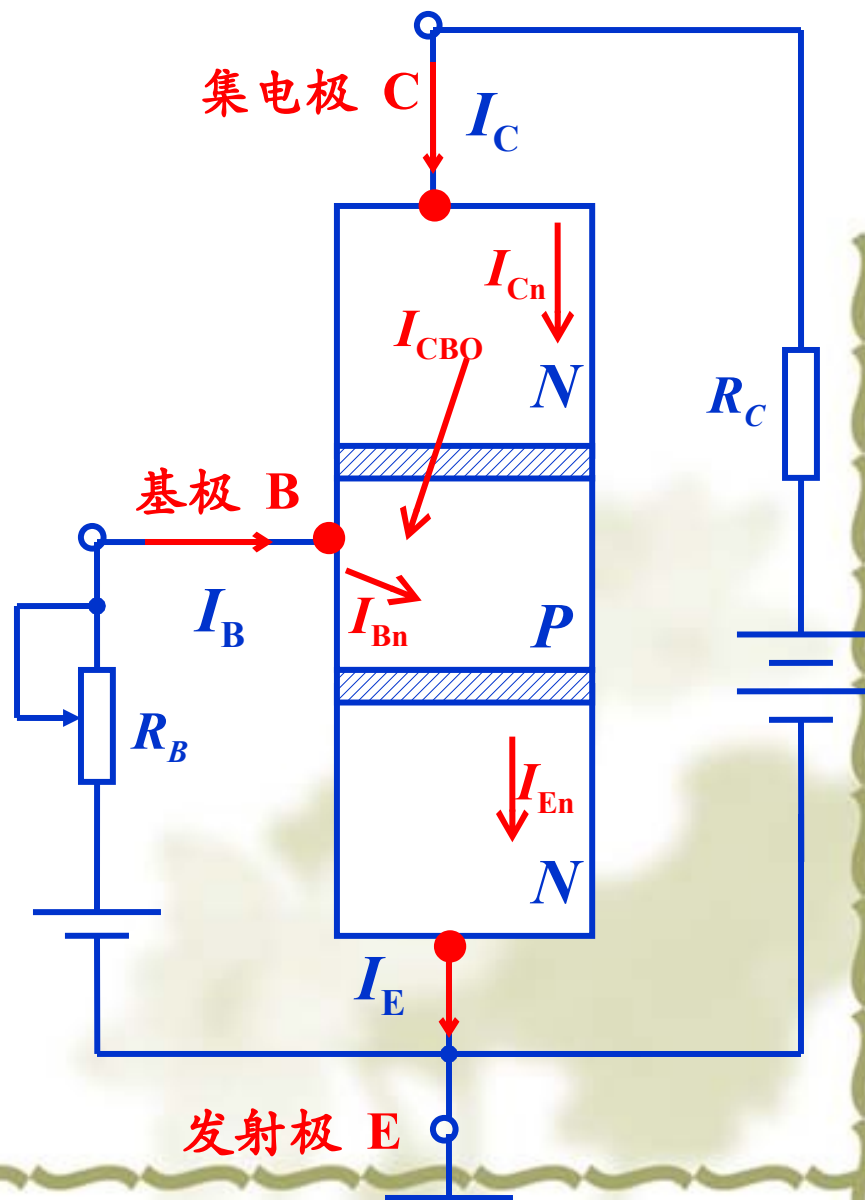
问题： I_E 、 I_C 、 $I_B = ? \rightarrow$ KCL

$$I_E = I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

$$I_B = I_{Bn} - I_{CBO}$$

$$I_C = I_{cn} + I_{CBO}$$

结论 1： $I_E = I_B + I_C$



一、NPN 型三极管的电流放大原理

电流关系：

$$\because I_E = I_{Bn} + I_{Cn} = (1 + \bar{\beta}) I_{Bn}$$

$$1、I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

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

$$2、I_{En} \approx I_{Cn} \quad I_{Cn} \gg I_{Bn}$$

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

$$3、\frac{I_{Cn}}{I_{Bn}} = \bar{\beta} \gg 1$$

$$I_C = \bar{\beta} I_B + \bar{\beta} I_{CBO}$$

问题： I_E 、 I_C 、 $I_B = ? \rightarrow$ KCL

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

$$I_E = I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

$$I_B = I_{Bn} - I_{CBO}$$

$$I_C = I_{cn} + I_{CBO}$$

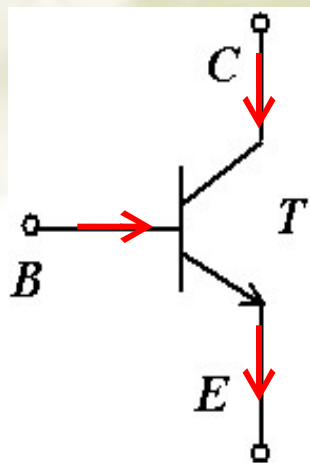
穿透电流 \rightarrow 很小

$$\text{结论 2: } I_C \approx \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$\text{结论 1: } I_E = I_B + I_C \approx (1 + \bar{\beta}) I_B$$

一、NPN 型三极管的电流放大原理

发射结正偏，集电结反偏



NPN

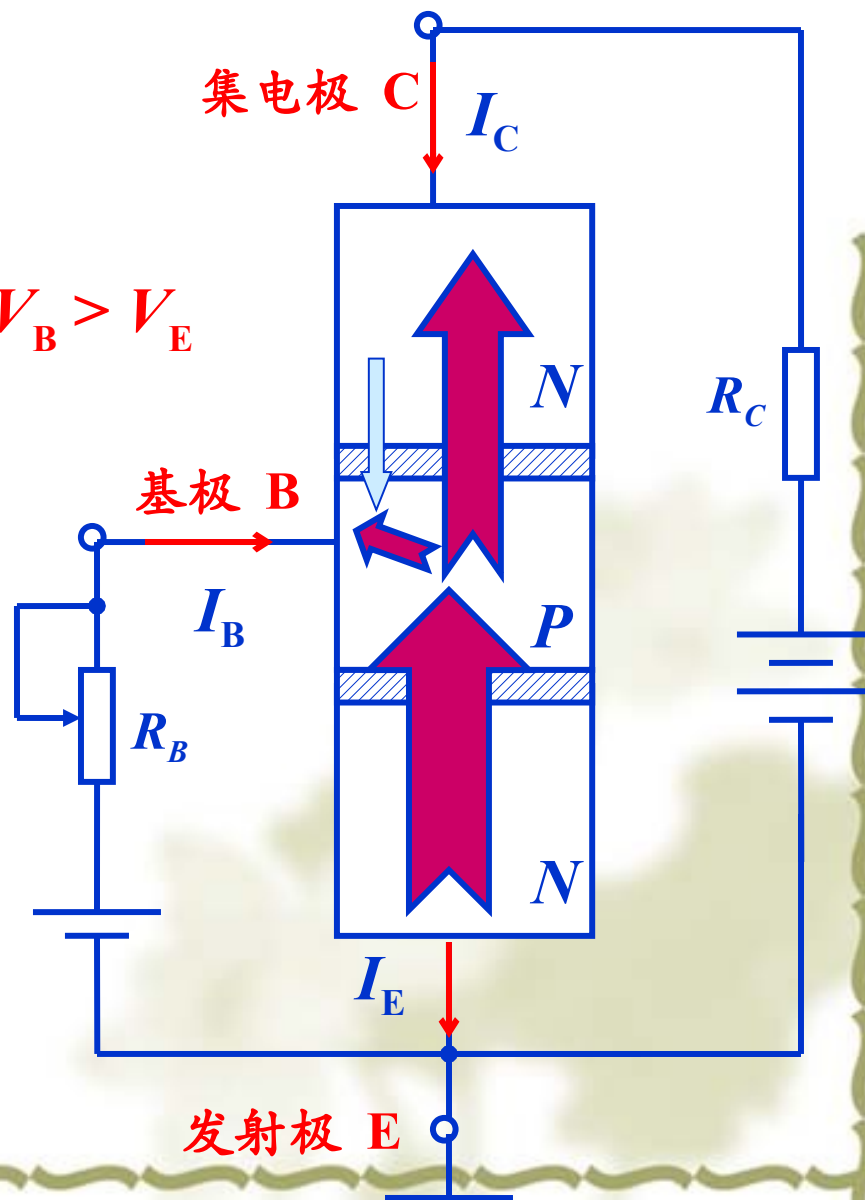
$$V_C > V_B > V_E$$

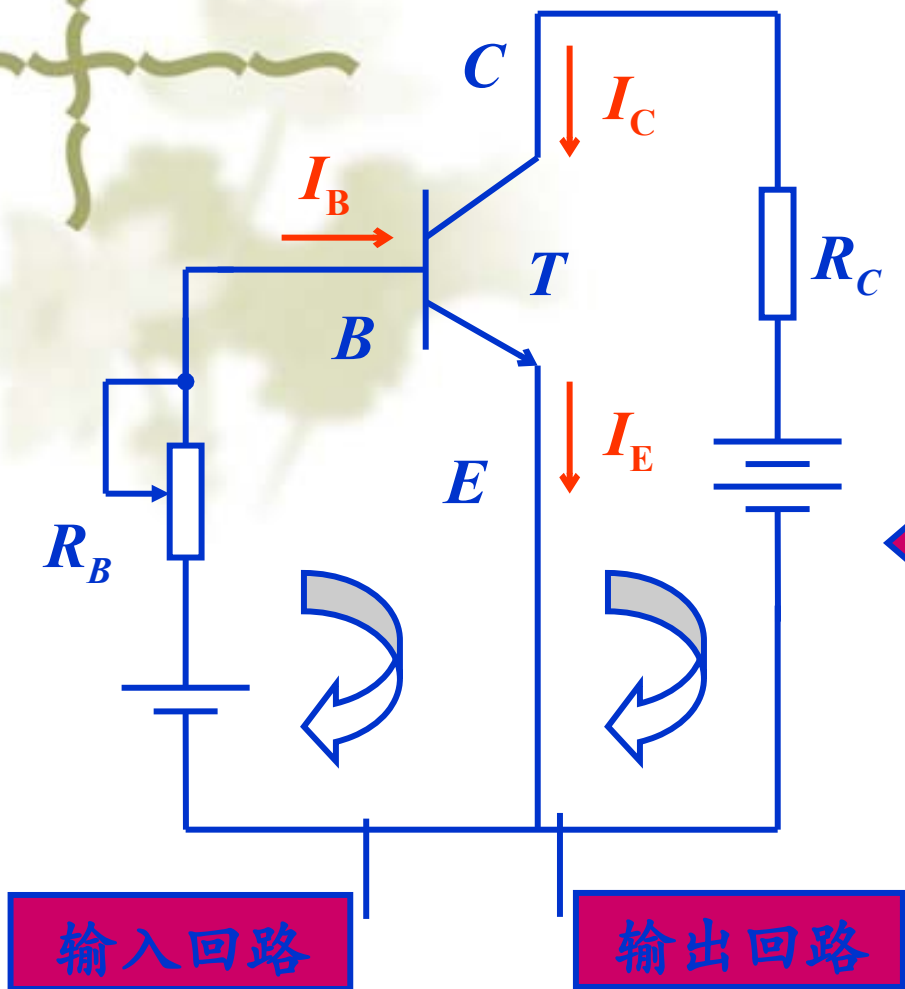
$$1、I_E = I_B + I_C \approx (1 + \bar{\beta}) I_B$$

$$2、I_C \neq I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta} I_B$$

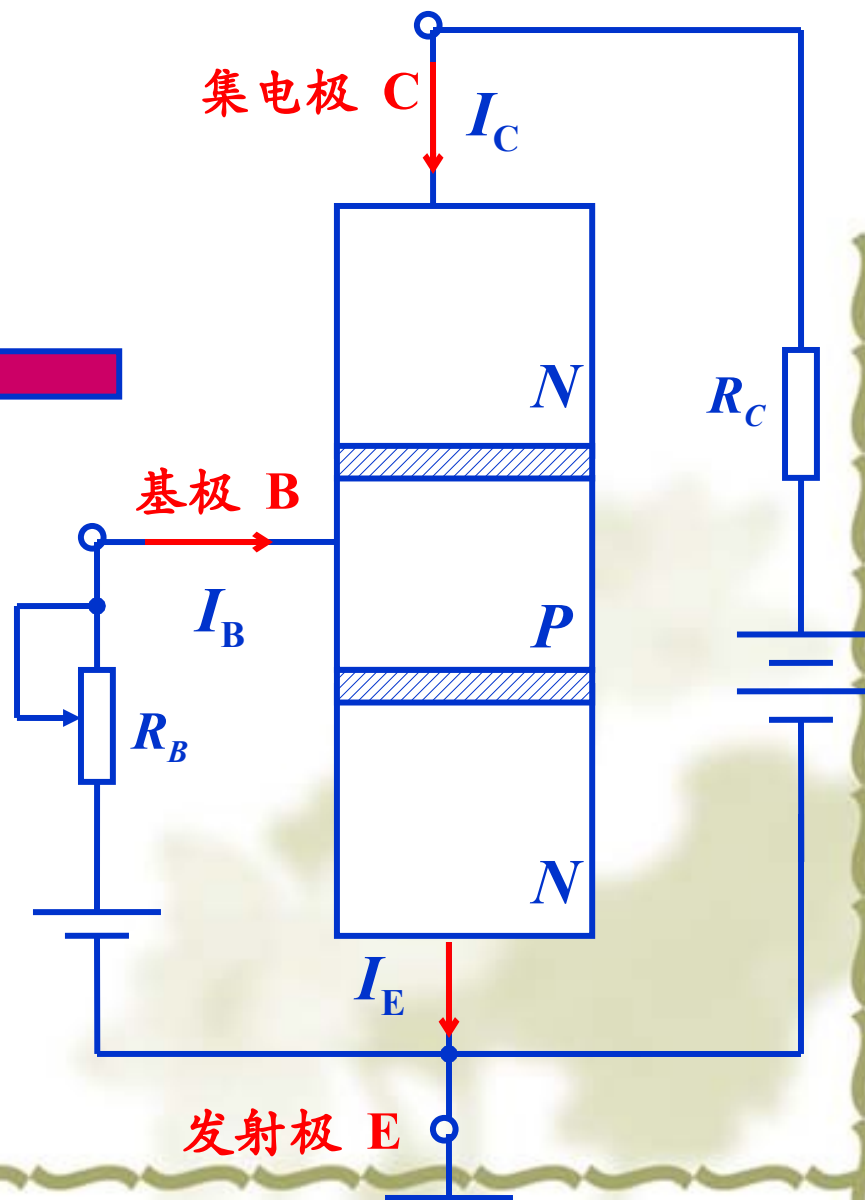
$$3、\frac{I_C}{I_B} \approx \bar{\beta} \gg 1 \rightarrow \text{常数}$$

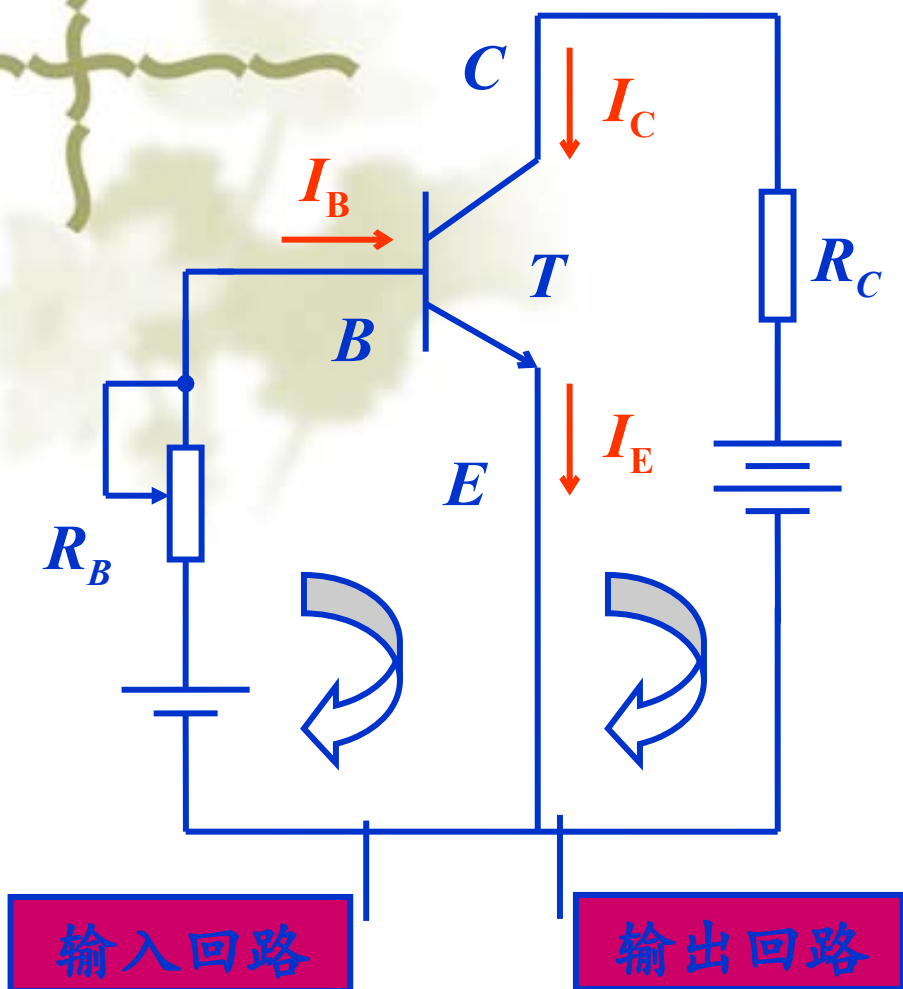
直流电流放大倍数





共射接法 { 公共端：发射极 E
输入端：基极 B
输出端：集电极 C





共射接法 {

- 公共端：发射极 E
- 输入端：基极 B
- 输出端：集电极 C

改变电阻 R_B

↓

改变输入电流 I_B

↓

$I_C \approx \beta I_B$

↓

改变输出电流 I_C

∴ 三极管不仅可以实现电流的放大，还能实现输入信号对输出信号的控制。

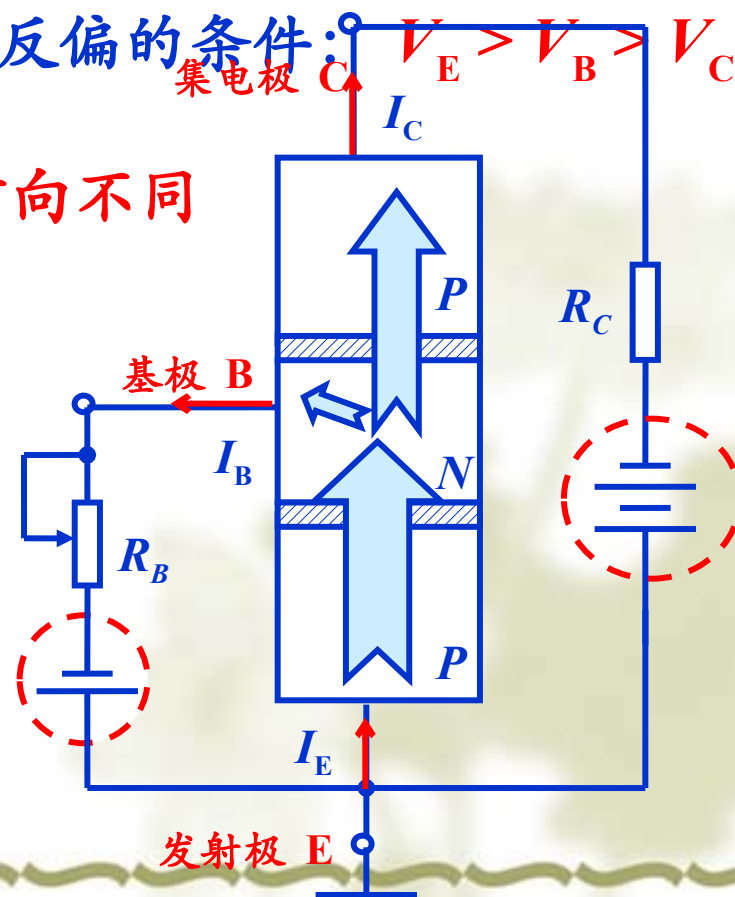
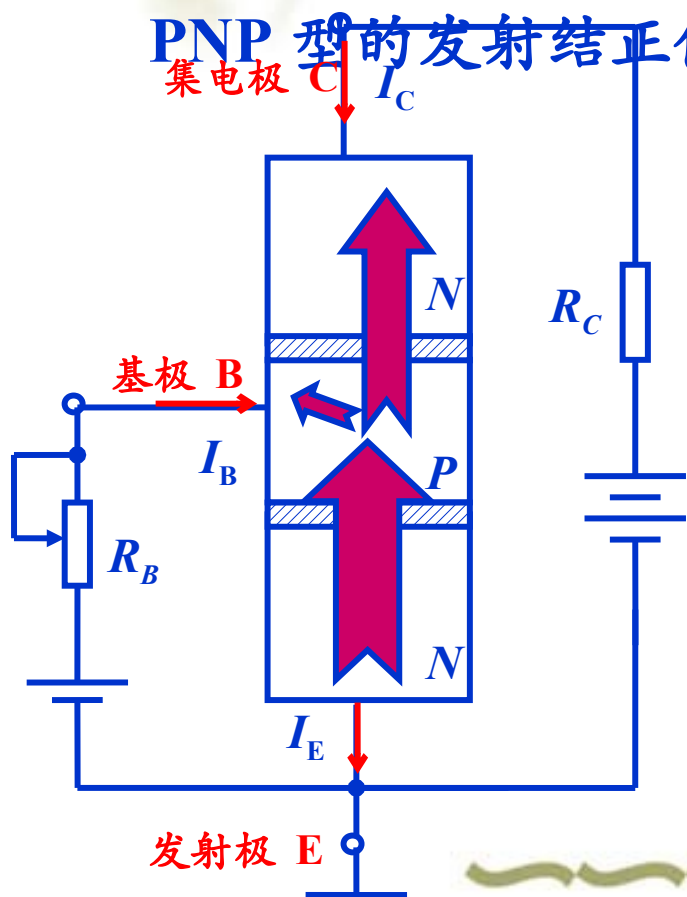
二、PNP 型三极管的电流放大原理

PNP 型三极管的工作原理和 NPN 型非常类似，区别点有两点：

1、NPN 型的发射结正偏，集电结反偏的条件： $V_C > V_B > V_E$

PNP 型的发射结正偏，集电结反偏的条件： $V_E > V_B > V_C$

2、电流方向不同



例题1: P118 4-11 用万用表测得在某电路中正常工作的三极管

$$U_{CE}=3V, U_{BE}=0.67V, I_E=5.1mA, I_C=5mA$$

问: ① 什么类型什么材料的管子? ② $I_B=?$ $\bar{\beta} \approx ?$

$\because V_C > V_B > V_E \longrightarrow$ 符合**NPN型**三极管放大条件

硅: 0.6V-1V

$\because U_{BE}=0.67V \longrightarrow$ 符合**硅材料**的管压降

锗: 0.2V-0.5V

$$\because I_E = I_B + I_C \longrightarrow I_B = 0.1mA \quad I_C = \bar{\beta}I_B + I_{CEO} \approx \bar{\beta}I_B \quad \bar{\beta} \approx I_C / I_B = 50$$

已知：三极管 T 工作在放大状态，若 $V_X =$

$5V$ ， $V_Y = 3.7V$ ， $V_Z = 3V$ ；问：T 是何种

类型、何种材料制成？X，Y，Z 分别表示哪

个电极？

∴ 发射结正偏，集电结反偏

对于 NPN 而言，当发射结正偏，集电结反偏时， $V_C > V_B > V_E$

对于 PNP 而言，当发射结正偏，集电结反偏时， $V_E > V_B > V_C$

结论：第二小的电位对应三极管 B 极，所以 Y 即 B 极

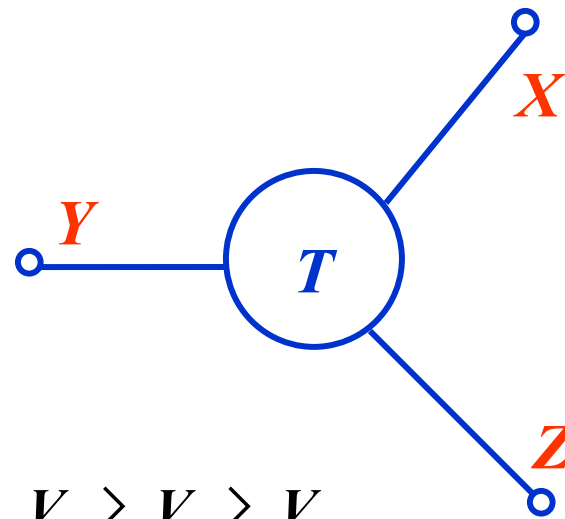
当发射结正向偏置时，硅管的管压降为 $0.7V$ ，锗管的管压降为 $0.2V$

∴ $V_Y - V_Z =$

$0.7V$ Z 是三极管的 E 极，X 是电极 C，三极管是用硅材料制成的

∴ $V_B > V_E$

∴ T 为 NPN 型三极管



练习：4-12

例题2: P118 4-12 用万用表测得在某电路中**正常工作**的三极管

$V_X = -9V$, $V_Y = -6V$, $V_Z = -6.2V$,

问: ① 三极管是什么类型什么材料? ② X, Y, Z表示哪个电极?

没有用到的**X**一定是代表集电极**C**

硅: 0.6V-1V

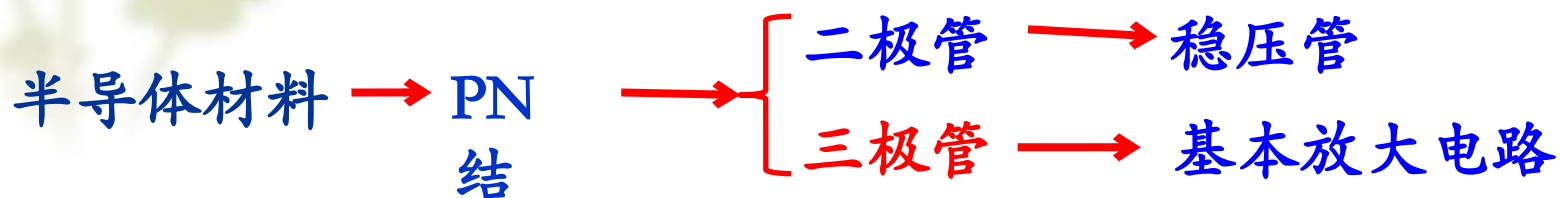
锗: 0.2V-0.5V

对于 NPN 而言, 当发射结正偏, 集电结反偏时, $V_C > V_B > V_E$

对于 PNP 而言, 当发射结正偏, 集电结反偏时, $V_E > V_B > V_C$

$\therefore V_X$ 电位最低 $\therefore T$ 为**PNP型**三极管 \therefore **Y**为发射极**E**, **Z**为基极**B**

半导体二极管和三极管



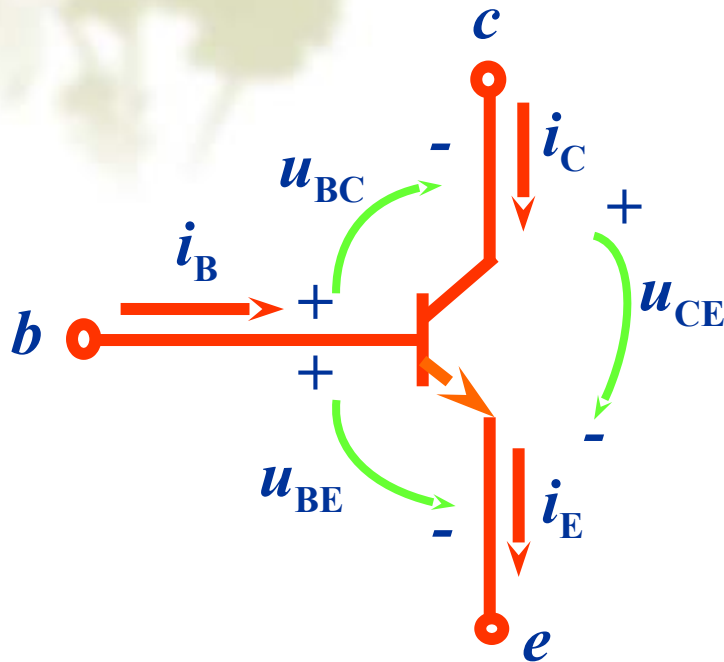
主要内容有：

- ◆ 三极管的结构
- ◆ 三极管的放大原理 → 定性
- ◆ 三极管的伏安特性曲线 → 定量
- ◆ 三极管的参数
- ◆ 温度对三极管的影响

(3) 三极管的特性曲线

伏安特性曲线：加载的电压电流关系，针对二端器件。

三极管是三个管脚的器件，如何定义伏安特性曲线？



NPN 型晶体管的电压和电流参考方向

- $i_E = i_C + i_B$

- $u_{CE} = u_{BE} - u_{BC}$

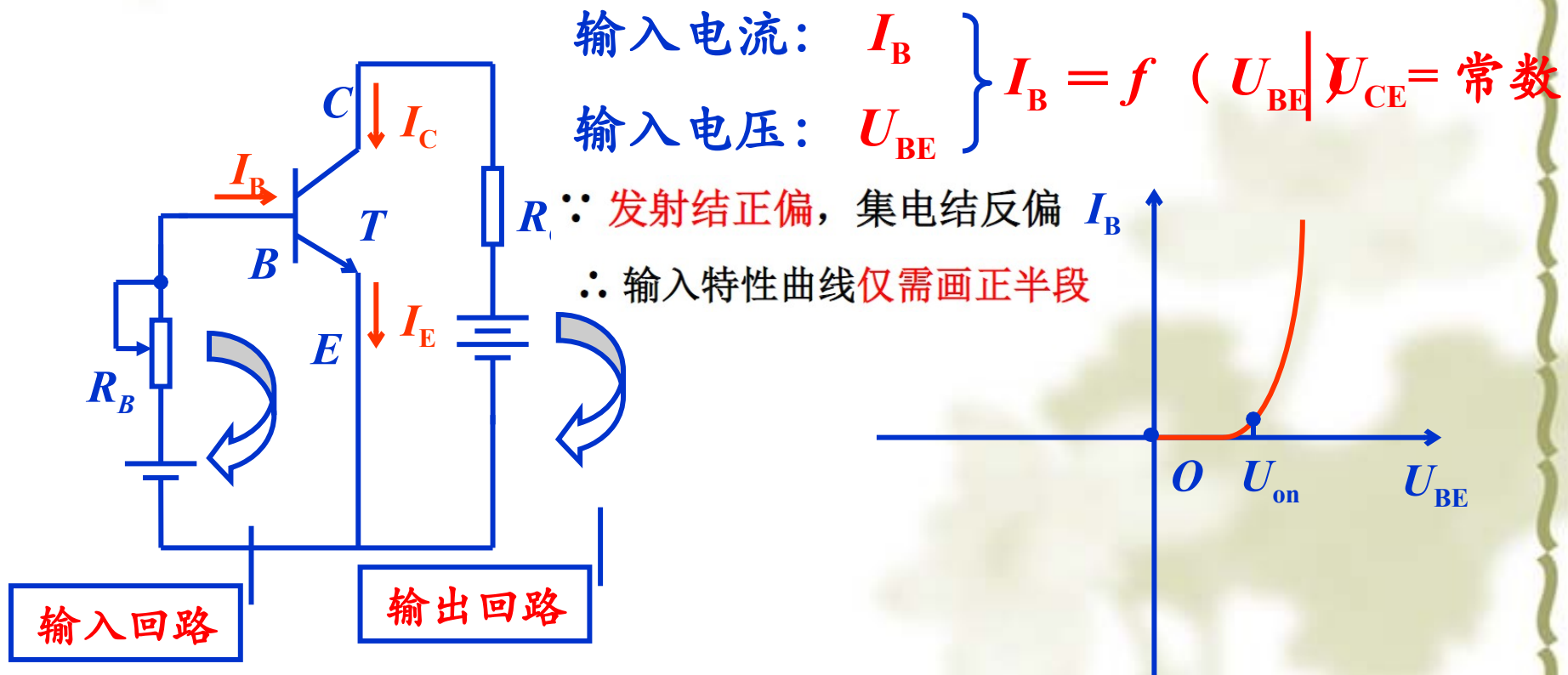
- 通常是以发射极为公共端，画出 i_C 、 i_B 、 u_{CE} 和 u_{BE} 四个量的关系曲线，称为共射极特性曲线。

三极管的特性曲线分为输入特性曲线和输出特性曲线两种。
以 NPN 型三极管为例，进行说明。

(3) 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线可以分为输入特性曲线和输出特性曲线两种。以NPN型三极管为例，进行说明。

(1) 输入特性曲线 → 输入电流和输入电压之间的关系



(1) 输入特性曲线

特点：（和二极管类似）

1、同样存在一个“死区电压”

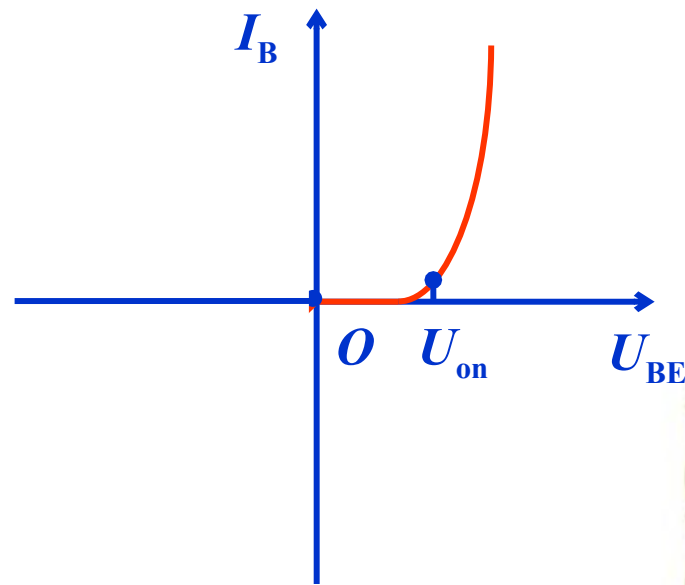
当 $U_{BE} < U_{on}$ 时，发射结未导通

当 $U_{BE} > U_{on}$ 时，发射结导通

硅三极管的死区电压是 0.5 V ，导通后， $U_{BE} = 0.7\text{ V}$

锗三极管的死区电压是 0.1 V ，导通后， $U_{BE} = 0.2\text{ V}$

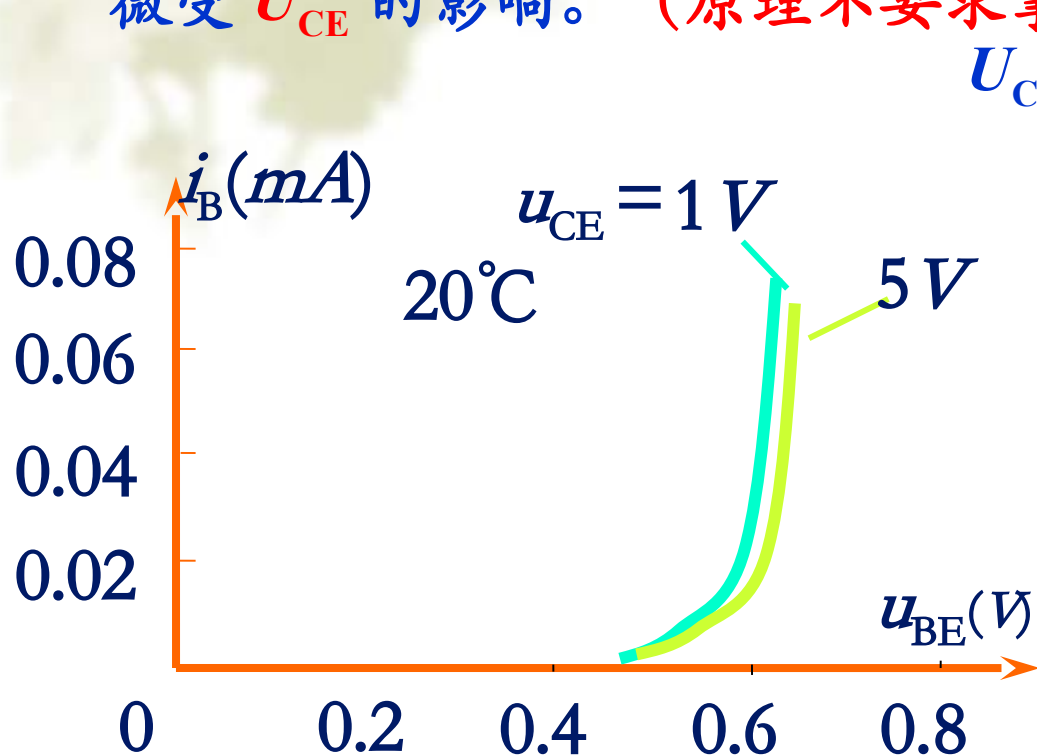
2、当发射结反偏时，发射结处于截止状态。 $I_B \approx 0\text{ A}$ ，负半段的曲线省略不画



补充说明：输入特性曲线会略微受 U_{CE} 的影响。

(1) 输入特性曲线

补充说明：当 $U_{CE} \geq 1$ 后曲线几乎不变，输入特性曲线会略微受 U_{CE} 的影响。（原理不要求掌握）



3DG4 的输入特性

基区调制效应

$U_{CE} \rightarrow U_{CB} \rightarrow$ 集电结反向电压 \uparrow

基区变窄 \leftarrow 集电结变宽

发射区发射的自由电子和
基区空穴的复合几率变小

I_B

输入特性曲线会略微向右移动

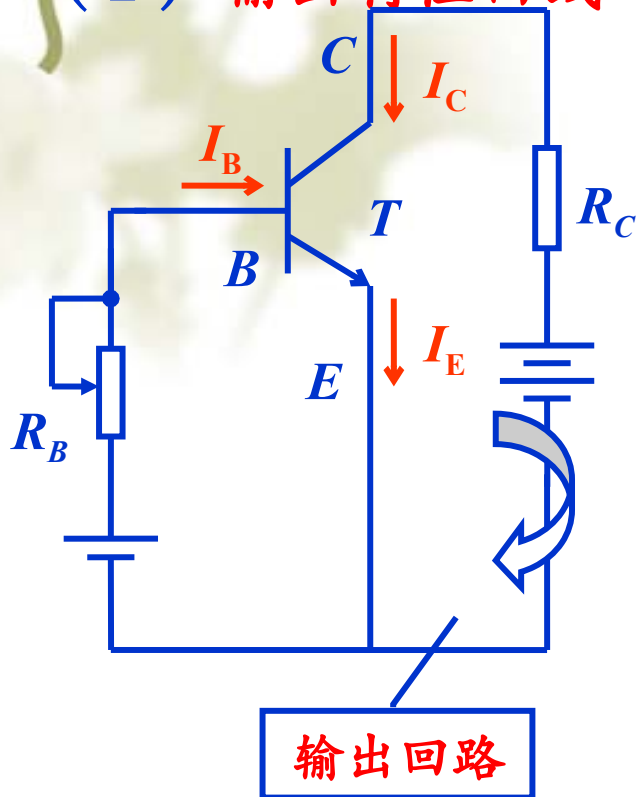
(2) 输出特性曲线 → 输出电流和输出电压之间的关系

输出电流: I_C
输出电压: U_{CE} } $I_C = f(U_{CE})$

$$\therefore I_C \approx \beta I_B$$

\therefore 在讨论两者关系时, 须使 I_B 为常数

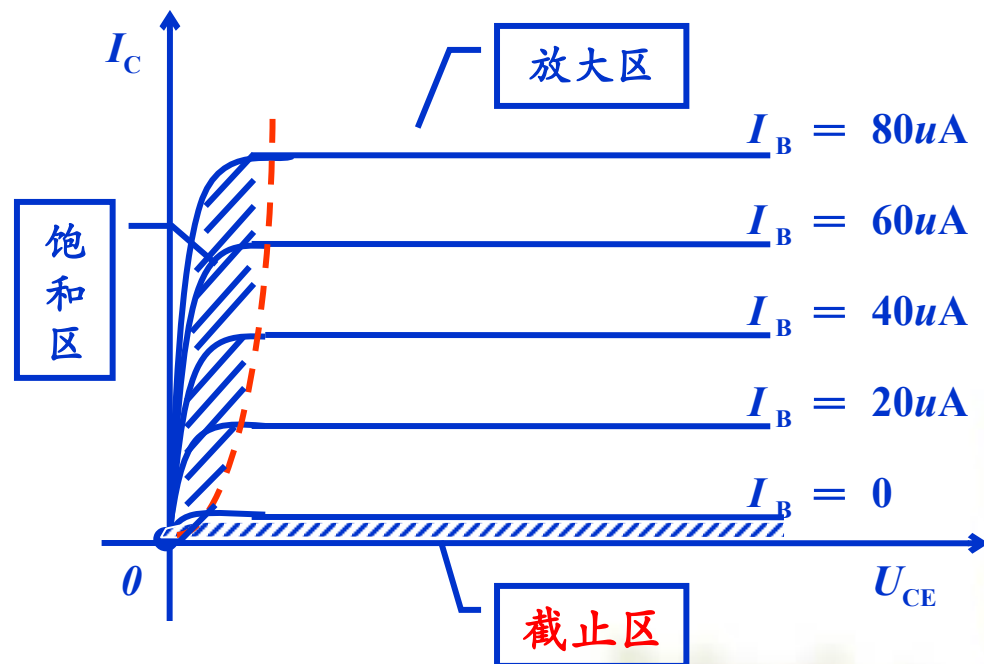
$$I_C = f(U_{CE}) \mid I_B = \text{常数}$$



分别以 $I_B = 0$,
 $20\mu A$, $40\mu A$,
 $60\mu A$, $80\mu A$, 通过
实验测出 5 条曲线



(2) 输出特性曲线:



① 截止区 $\longrightarrow I_B = 0$ 的曲线以下的区域

$I_B \leq 0 \longrightarrow U_{BE} \leq 0 \longrightarrow$ 发射结反偏 \longrightarrow 无电流放大

※ 特点: 1、发射结反偏 2、 $I_B \approx 0$ 3、无电流放大

此时, $I_C \neq 0$, $I_C = \bar{\beta} I_B + I_{CEO} = I_{CEO} \longrightarrow$ 穿透电流

$\therefore I_{CEO}$ 非常小, 可以忽略不计 \therefore 可认为三极管处于截止状态

(2) 输出特性曲线:

② 放大区

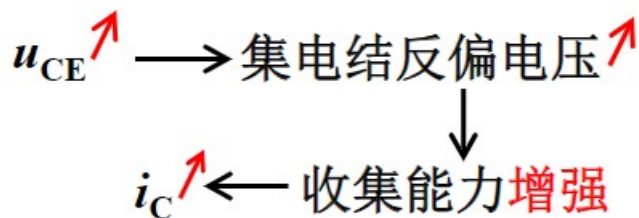
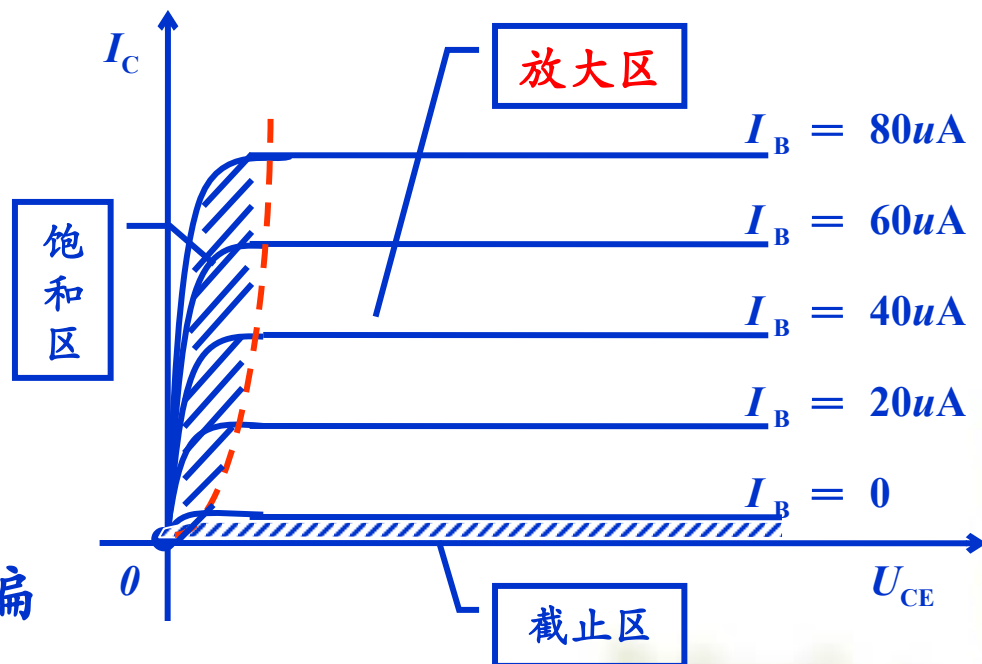
特点:

1、有电流放大作用

2、发射结正偏，集电结反偏

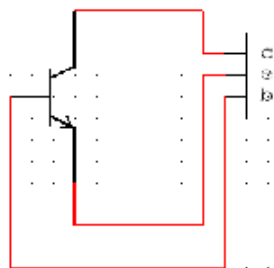
3、 $\because I_C \approx \beta I_B$ (β 是常数)

4、理想情况放大区为平行线，实际三极管的放大区曲线会略微受到 U_{CE} 的影响而出现上翘情况。



说明：后续放大电路的仿真实验为了保证实验效果，均采用**虚拟三极管**。

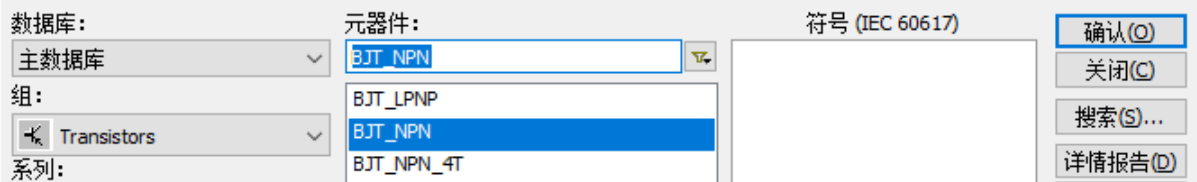
虚拟三极管



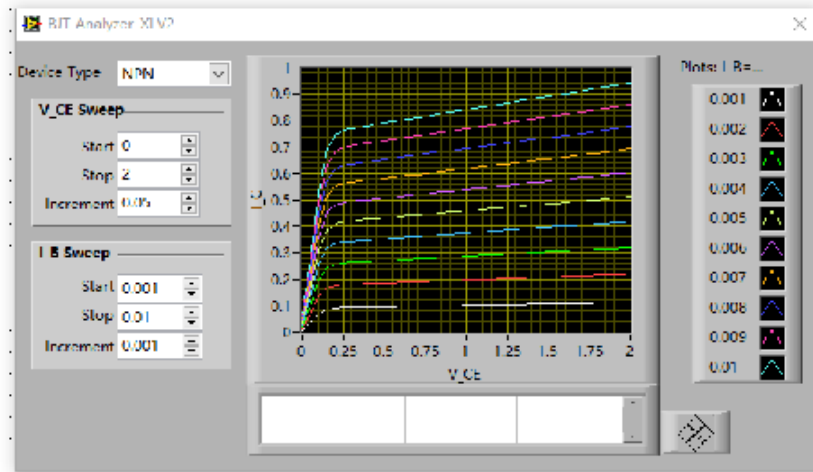
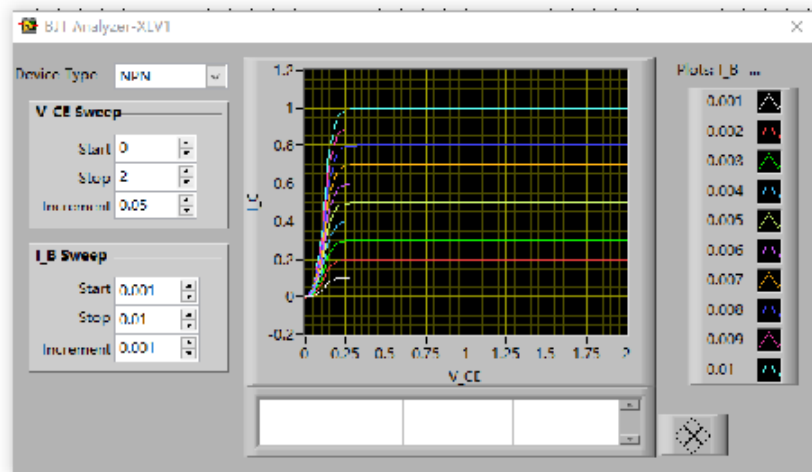
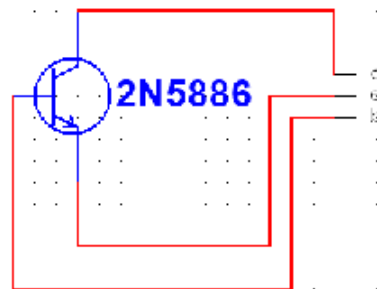
三极管特性曲线 - Multisim - [设计1 *]



选择一个元器件



实际三极管



(2) 输出特性曲线:

③ 饱和区

∴ 当三极管工作在放大区

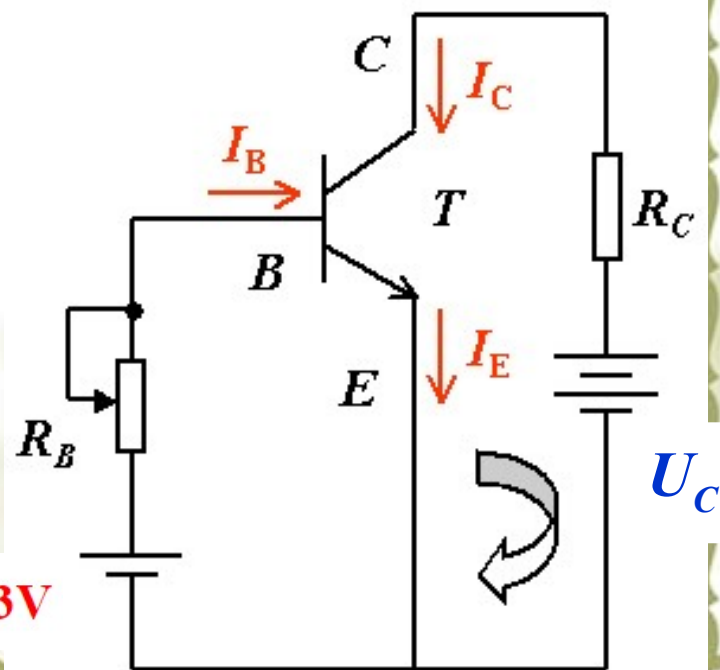
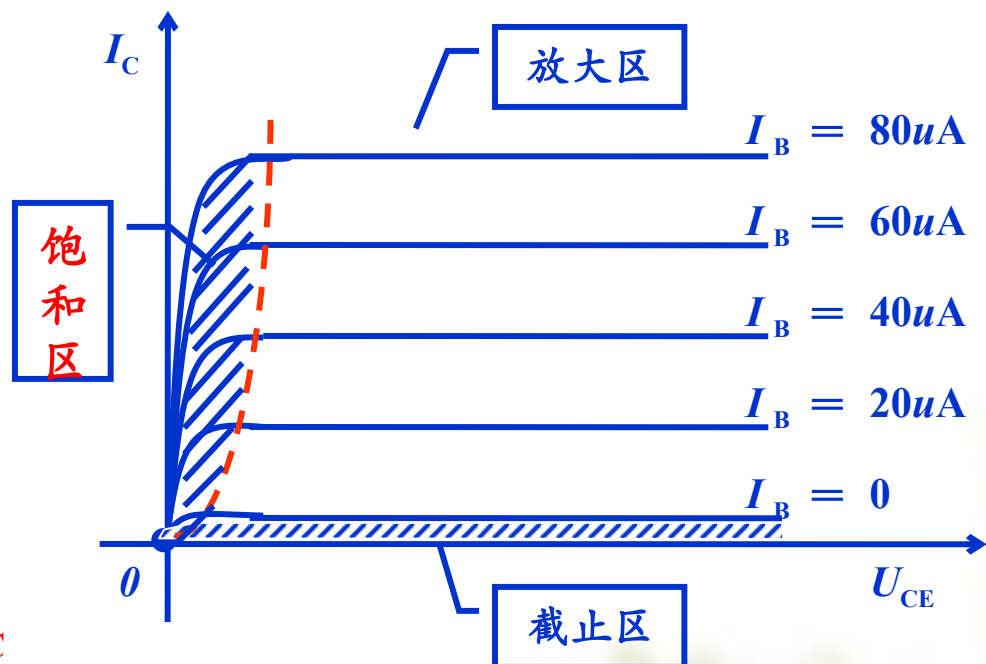
$$\therefore I_C \approx \beta \bar{I}_B$$

$$\therefore \text{KVL: } U_{CE} = U_C - I_C R_C$$

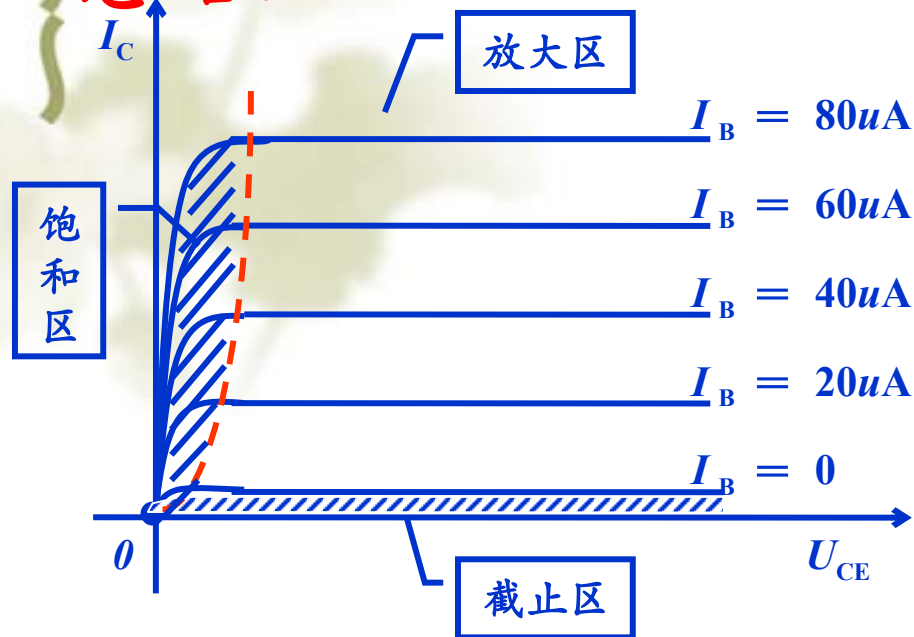
$$\therefore I_B \uparrow \longrightarrow I_C \uparrow \longrightarrow U_{CE} \downarrow$$

当 $U_{CE} \downarrow = U_{BE} = 0.7$ 时, 此时 $V_C = V_{BE}$ 集电结不再反偏, 没有能力再收集
此时的三极管进入“**临界饱和**”状态。

临界饱和压降 $U_{CES} = 0.7$ 深度饱和压降 $U_{CES}' = 0.3V$



总结:



问: 有几种方法可判断T的状态?

两种方法: 电流法和电位法

方法一: 通过基极电流 i_B 判断
例题请看视频材料, 后续再介绍

可帮助了解放大电路非线性失真

方法二: 通过3个管脚电位判断

① 判断T是NPN管还是PNP管?

② 判断发射结和集电结的状态;

1、截止区的特点:

① 发射结反偏

② 无电流放大 ($I_C \neq \beta I_B$)

穿透电流 $\leftarrow = I_{CEO}$

2、放大区的特点:

① 有电流放大作用 ($I_C = \beta I_B$)

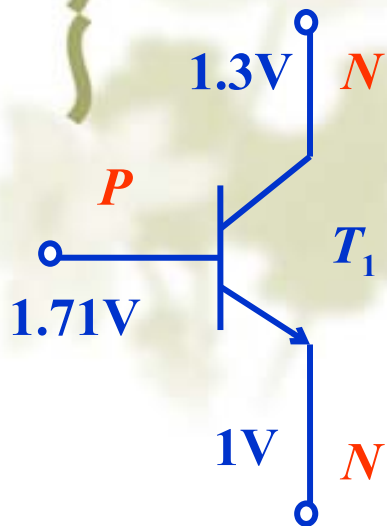
② 发射结正偏, 集电结反偏

3、饱和区的特点:

① 无电流放大 ($I_C \neq \beta I_B$)

② 发射结正偏, 集电结正偏

4-13 判断管子是用何种材料做成，处于何种工作状态？



步骤：

1，判断 B、E、C 极

2，标出 PNP 还是 NPN

3，判断发射结正偏还是反偏

反偏即放大器截止状态

4，判断极电结正偏还是反偏

反偏即放大器放大状态

正偏即放大器饱和状态

$$\because V_B > V_E$$

\therefore 发射结正偏

$$\because U_{BE} = 0.71V$$

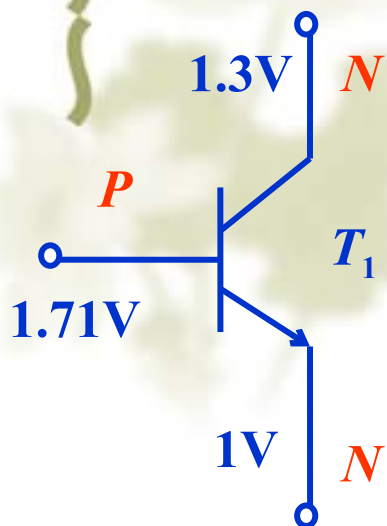
$\therefore T_1$ 为硅管

$$\because V_B > V_C$$

\therefore 集电结也正偏

$\therefore T_1$ 工作在饱和状态

4-13 判断管子是用何种材料做成，处于何种工作状态？



$$\because V_B > V_E$$

\therefore 发射结正偏

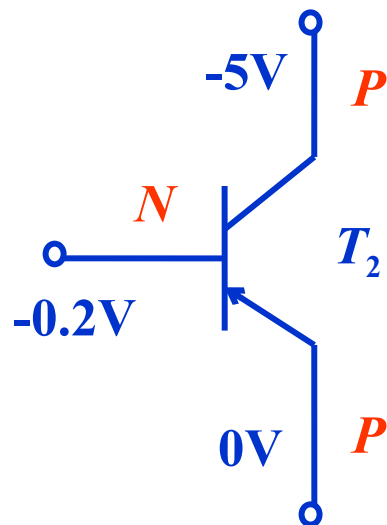
$$\because U_{BE} = 0.71V$$

$\therefore T_1$ 为硅管

$$\because V_B > V_C$$

\therefore 集电结也正偏

$\therefore T_1$ 工作在饱和状态



$$\because V_E > V_B$$

\therefore 发射结正偏

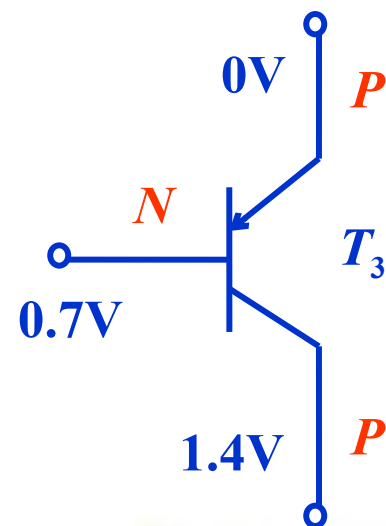
$$\because U_{EB} = 0.2V$$

$\therefore T_2$ 为锗管

$$\because V_B > V_C$$

\therefore 集电结反偏

$\therefore T_2$ 工作在放大状态

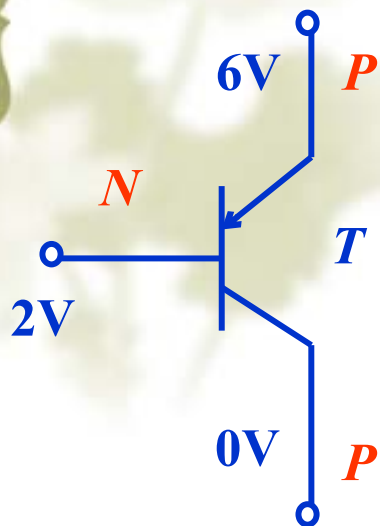


$$\because V_B > V_E$$

\therefore 发射结反偏

$\therefore T_3$ 工作在截止状态

4-13 判断管子是用何种材料做成，处于何种工作状态？



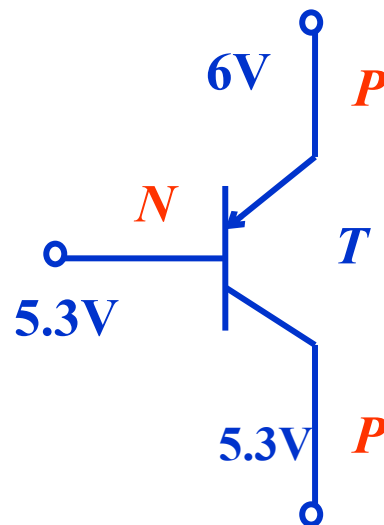
$$\because V_E > V_B$$

\therefore 发射结正偏

$$\because U_{EB} = 4V$$

\neq 正常管压降

$\therefore T$ 已经损坏



$$\because V_E > V_B$$

\therefore 发射结正偏

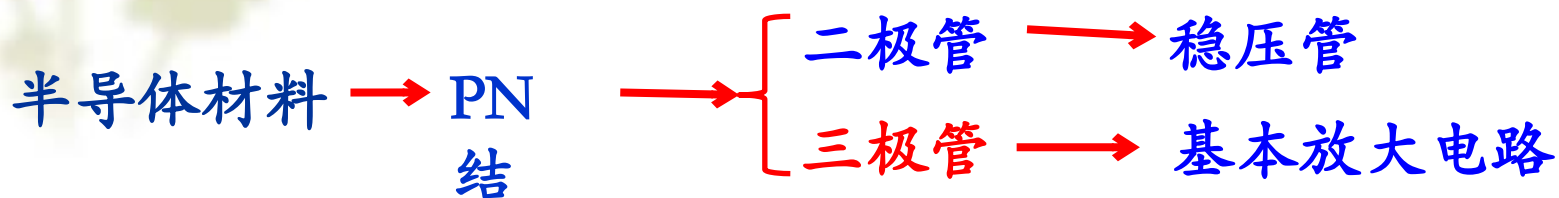
$$\because U_{EB} = 0.7V$$

$\therefore T$ 为硅管

$$\because V_B = V_C$$

$\therefore T$ 工作在临界饱和状态

半导体二极管和三极管



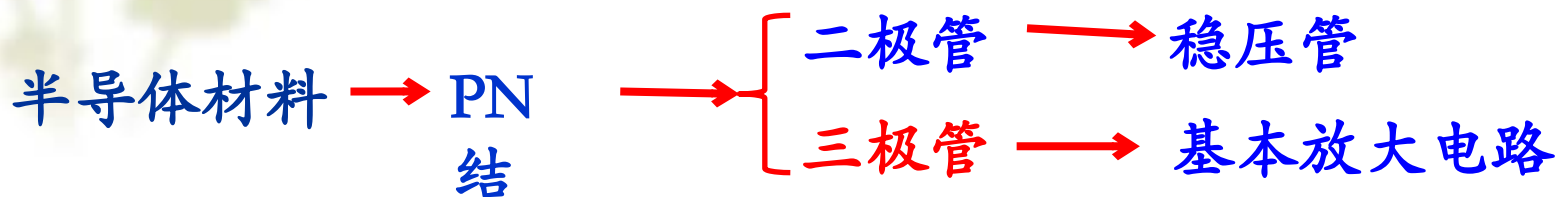
主要内容有：

- ◆ 三极管的结构
- ◆ 三极管的放大原理
- ◆ 三极管的特性曲线
- ◆ 三极管的参数
- ◆ 温度对三极管的影响

(5) 温度对晶体管参数的影响

- ① 温度 \nearrow \longrightarrow $\beta \nearrow$
- ② 温度 \nearrow \longrightarrow $I_{CBO} \nearrow$
- 随着温度升高，整个输出特性曲线向上平移，且曲线间的间隔增大。
- ③ 温度 \nearrow \longrightarrow $U_{BE} \searrow \longrightarrow$ 三极管的输入特性曲线会向左移动

半导体二极管和三极管



主要内容有：

- ◆ 三极管的结构
- ◆ 三极管的放大原理
- ◆ 三极管的特性曲线
- ◆ 三极管的参数
- ◆ 温度对三极管的影响

核心功能

应用：放大声音信号，放大接收到的无线信号等等

如何改善温度的影响：
差分放大器



作业： 4-11 至 4-13,4-15