

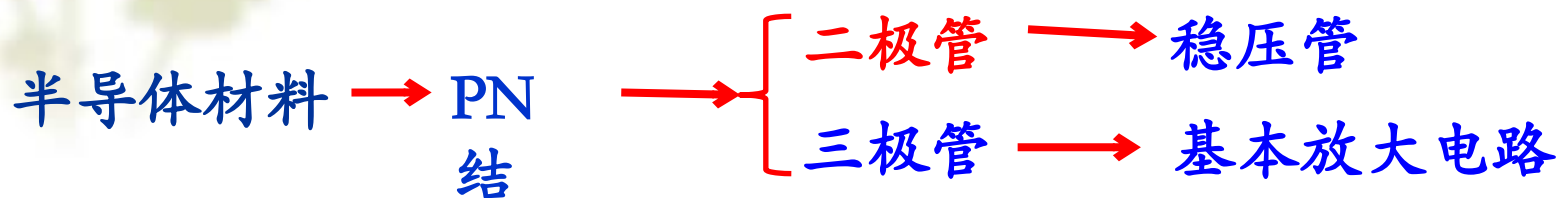
基础电路与电子学

主讲：陈开志

办公室：学院 2 号楼 304

Email: ckz@fzu.edu.cn

半导体二极管和三极管



主要内容有：

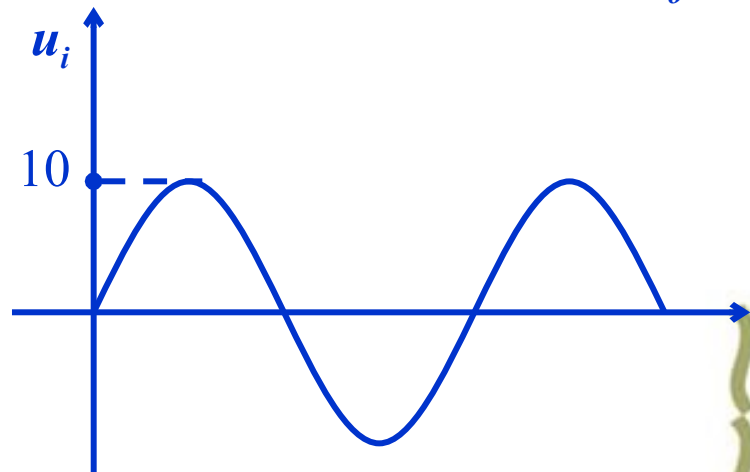
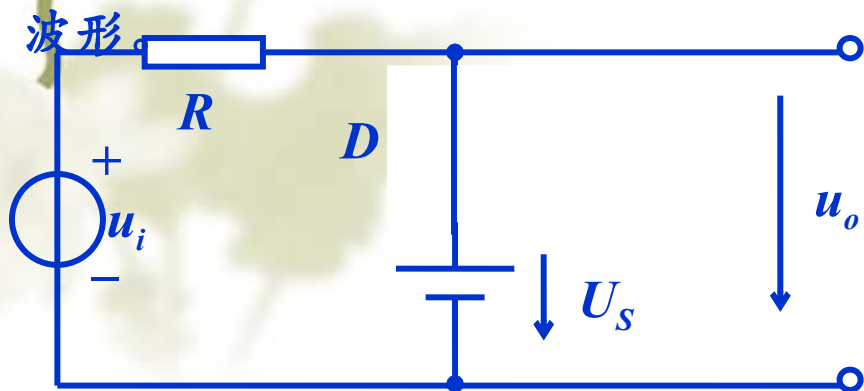
- ◆ 二极管的结构
- ◆ 二极管的伏安特性
- ◆ 二极管的主要参数
- ◆ 二极管的等效电路与应用
- ◆ 稳压二极管

4，二极管的等效电路与应用

二极管电路分析方法：

- 1，判断采用理想模型还是管压降的模型
- 2，断开二极管，P端为正，N端为负，判断加在两端电压大小。大于正向压降电压（稳压管电压）则导通，否则截止。
- 3，如果电路中有多个二极管时，电位差大的二极管优先导通，在此基础上再去分析其它二极管。

已知： $u_i = 10\sin\omega t$, $U_S = 5V$, 假设二极管 D 为理想二极管, 请作出 u_o 的



理想二极管的特性是:

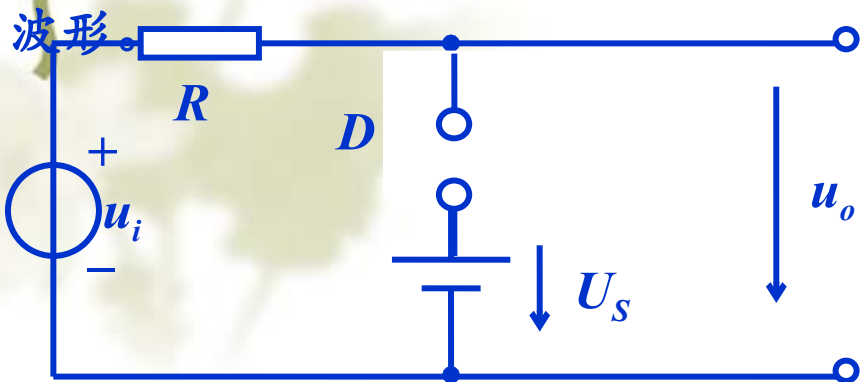
- ① 正向偏置, D 导通, 相当于导线;
- ② 反向偏置, D 截止, 相当于断开;

解题关键: 写出二极管断开时两端电压的表达式

$$\because u_i = u_D + U_S \quad \therefore u_D = u_i - U_S$$

- ① 当 $u_D > 0$ 时 ($u_i > U_S$), D 导通; 则 $u_o = U_S$

已知： $u_i = 10\sin\omega t$, $U_S = 5V$, 假设二极管 D 为理想二极管, 请作出 u_o 的



理想二极管的特性是:

- ① 正向偏置, D 导通, 相当于导线;
- ② 反向偏置, D 截止, 相当于断开;

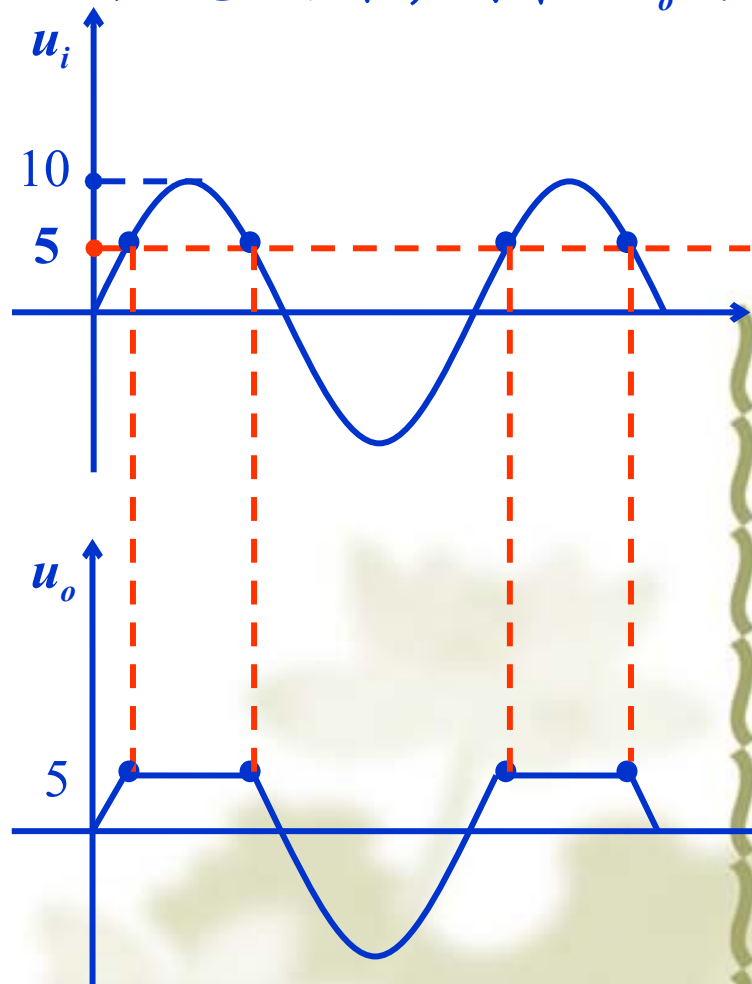
解题关键: 写出二极管断开时两端电压的表达式

$$\because u_i = u_D + U_S \quad \therefore u_D = u_i - U_S$$

① 当 $u_D > 0$ 时 ($u_i > U_S$), D 导通; 则 $u_o =$

U_S ② 当 $u_D < 0$ 时 ($u_i < U_S$), D 截止; 则 $u_o =$

u_i

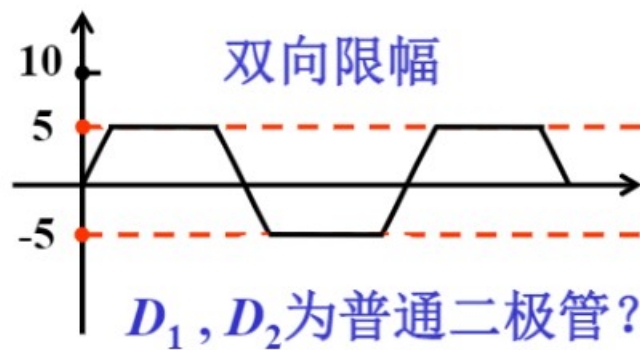
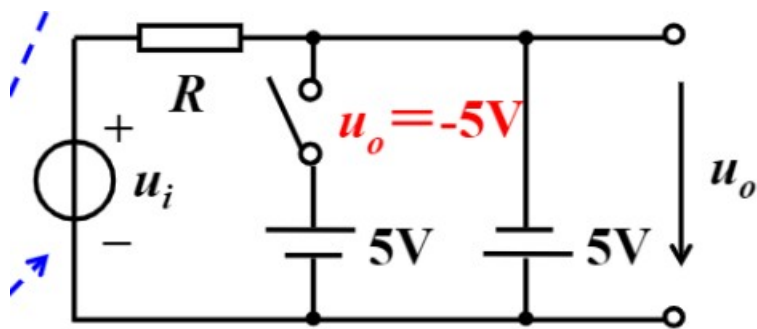
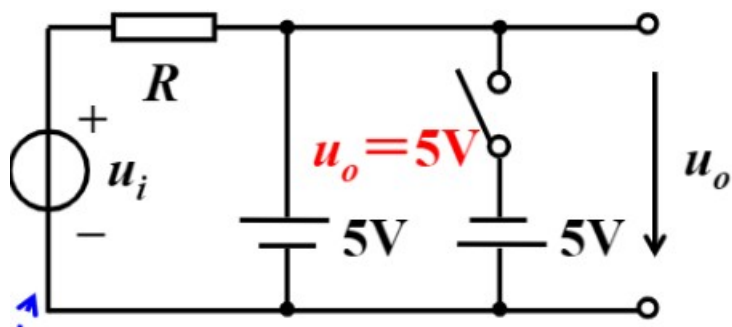
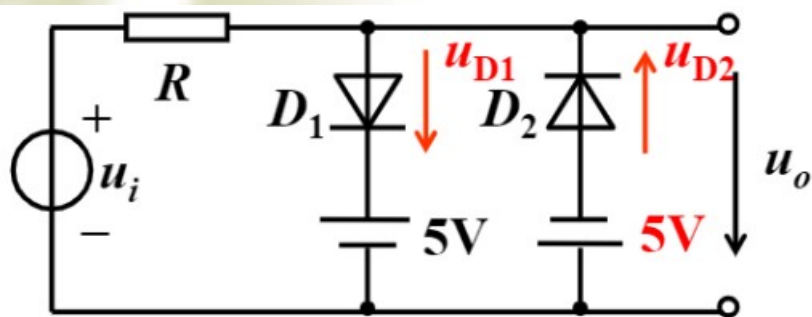


二极管作为“限幅

器”
思考要求小于 $-5V$ 时
也限幅, 怎么设计?

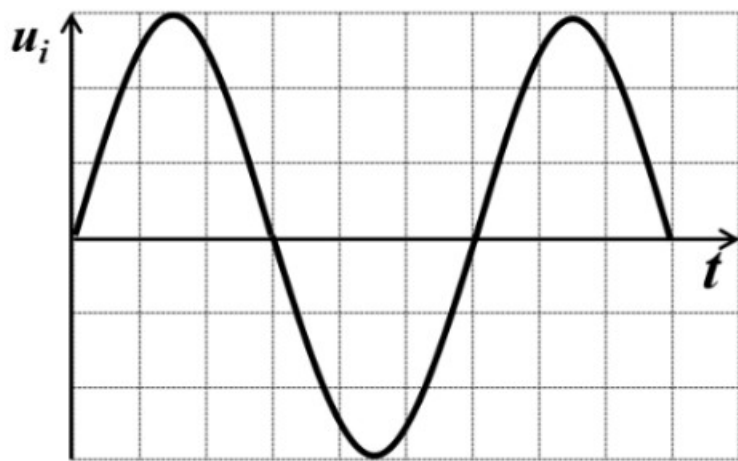
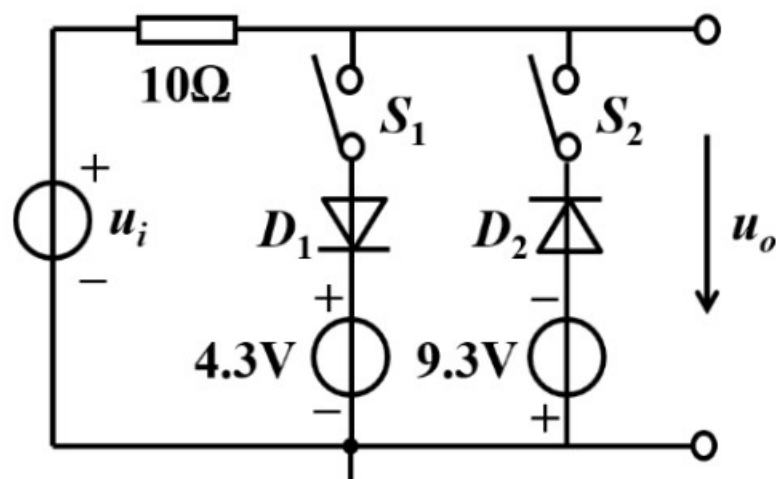
已知： $u_i = 10\sin\omega t$ ， $U_s = 5V$ ， 假设二极管 D 为理想二极管， 请作出 u_o 的波形。

思考要求小于 $-5V$ 时也限幅， 怎么设计？



作业：P116 4-4

实验二：限幅电路



假设 $u_i = 15\sin\omega t$, D_1 、 D_2 为硅普通二极管 ($U_D = 0.7\text{V}$), 请分析下面三种情况的 u_o 的波形。(请写出详细的分析过程)

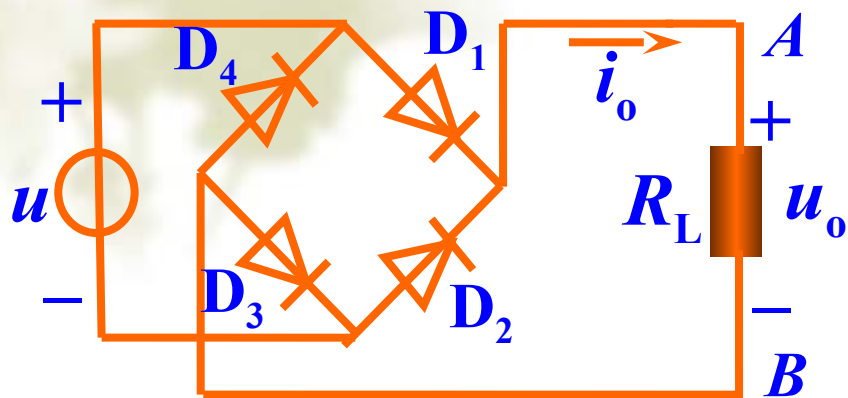
① S1闭合, S2打开; ② S1打开, S2闭合; ③ S1和S2全部闭合

↓
实现正向限幅

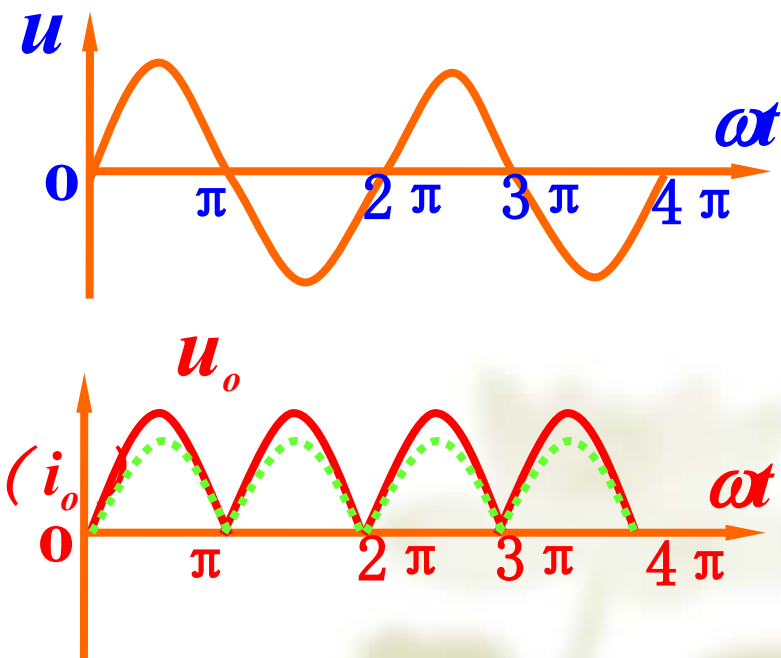
↓
实现负向限幅

↓
实现双向限幅

设交流电源 u 为: $u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2}U \sin \omega t (\text{V})$



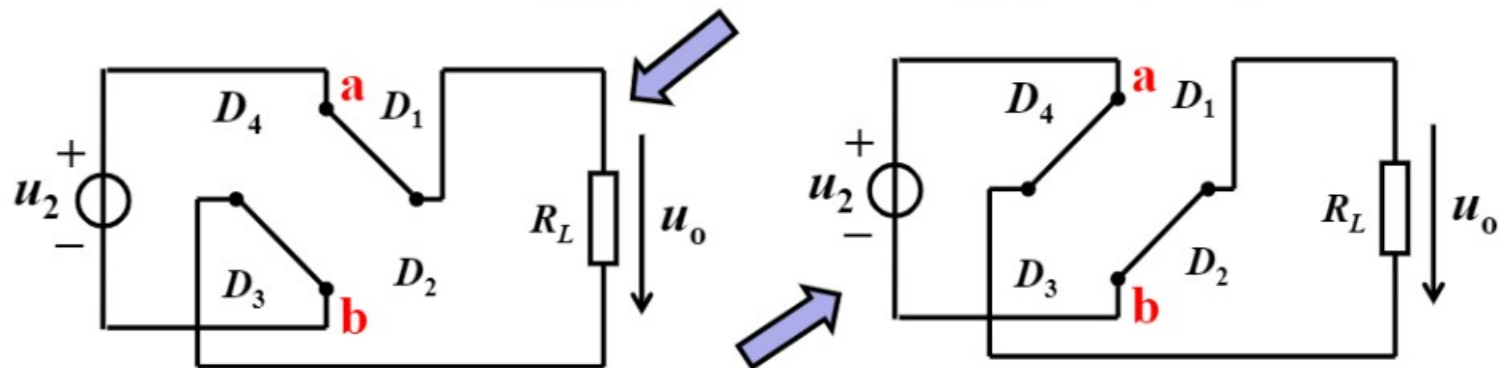
(a)



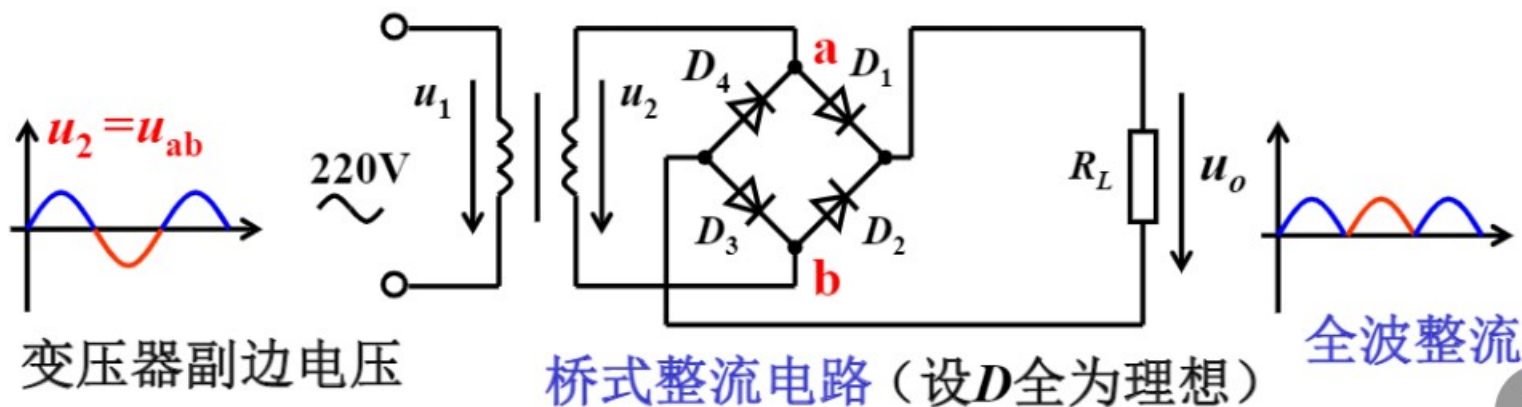
由于二极管具有单向导电性, 因此利用它可以进行交流电到直流电的转换。这样的电路叫**整流电路** (Rectifier Circuits)。图 (a) 就是一个实用的单相桥式全波整流电路, 常应用于直流稳压电源中。四个二极管 $D_1 \sim D_4$ 接成**电桥形式**。

全波整流工作原理：利用四个 D 的**两两交替导通**，实现方向统一

正半周期： $V_a > V_b$ **D_1 通 D_2 止**， **D_4 止 D_3 通** $u_o = u_{ab}$

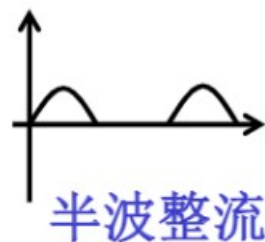


负半周期： $V_a < V_b$ **D_1 止 D_2 通**， **D_4 通 D_3 止** $u_o = u_{ba} = -u_{ab}$



问题1: 若任意一个 D 被烧断, 输出波形?

后果: 一定有半个周期的信号无法输出
此时的波形与单管整流的输出波形相同



问题2: 求整流后的直流分量 U_O ?

■ 负载电阻 R_L 中流过的电流 i_O 的平均值 I_O 为

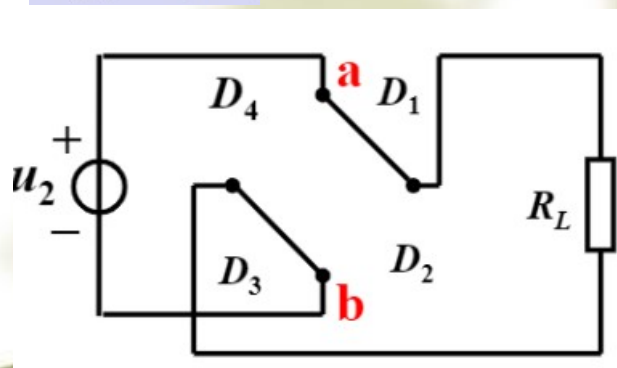
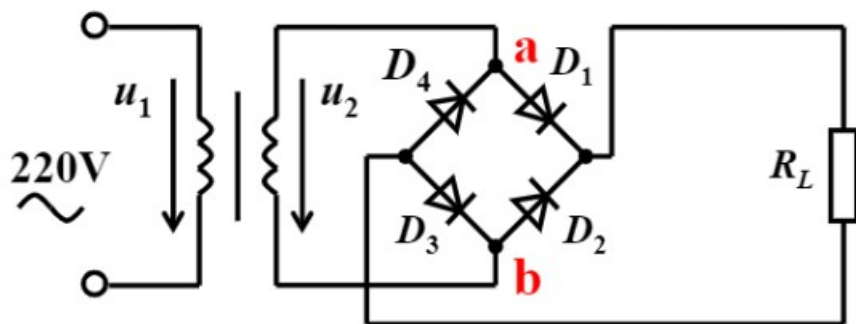
全波整流
$$U_O = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U \approx 0.9U$$

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = 0.9 \frac{U}{R_L}$$

半波整流
$$U_O = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U \sin \omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \approx 0.45U$$

问题3: 单管承担的最大反向电压?

$$U_{DR} = \sqrt{2}U$$



直流稳压电源电路 P293-294



思考：有载时如何进一步稳定电压？

利用稳压管

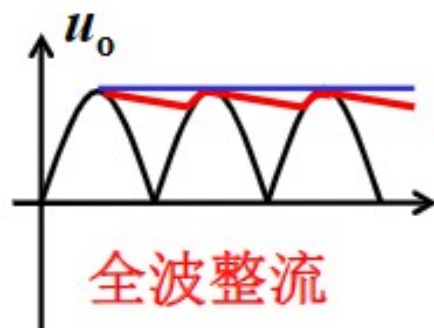
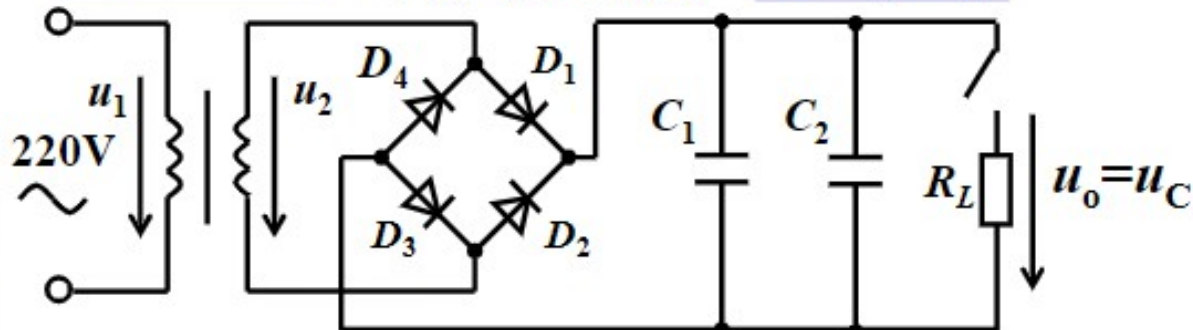
有载： $U_o \approx 1.2U_2$

空载： $U_o \approx 1.4U_2$

$$U_o \approx 0.9U_2$$

平滑电压波动

$$C = C_1 + C_2$$



电容是电压变化敏感器件 → 并联在负载两端

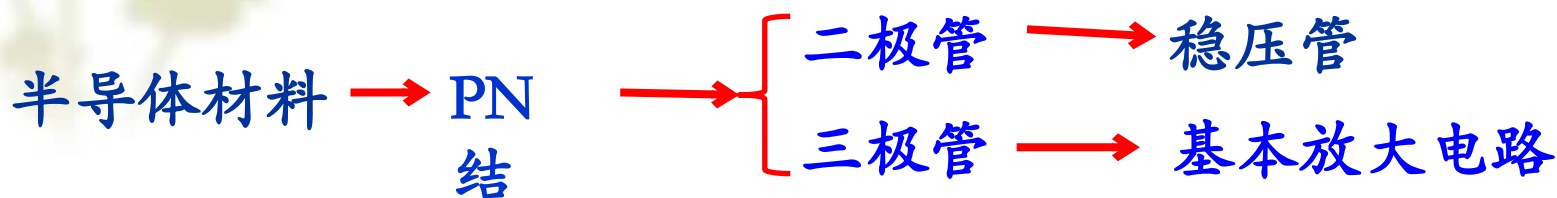
利用电容的储能性质，来减缓电压的衰减

注意：电容放电速度与时间常数 $\tau = R_L C$ 有关

P35 C 越大或 R_L 越大，放电越慢， u_o 越平滑

思考： $R_L = \infty$ (空载) 时？ 不存在放电回路

半导体二极管和三极管



主要内容有：

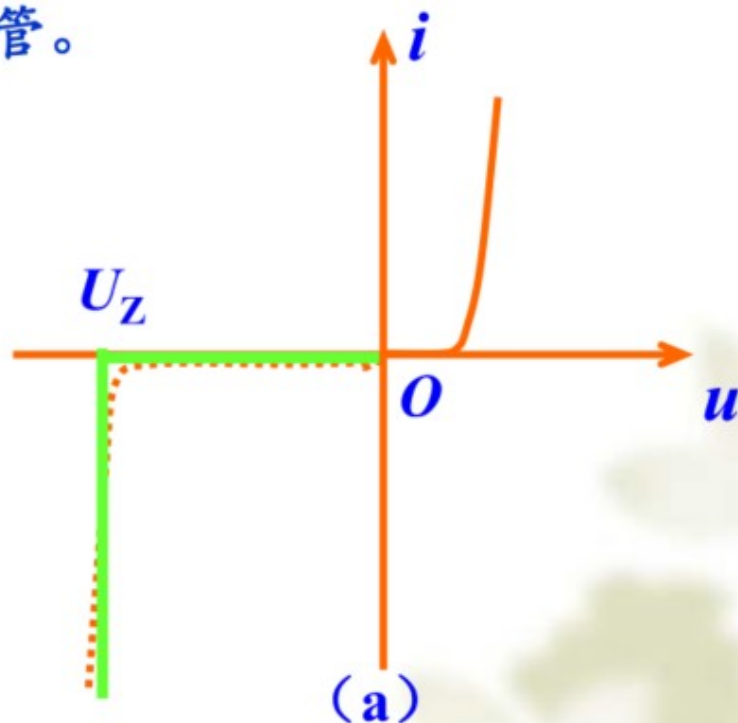
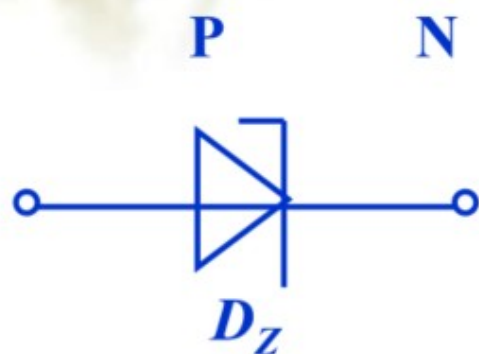
- ◆ 二极管的结构
- ◆ 二极管的伏安特性
- ◆ 二极管的主要参数
- ◆ 二极管的等效电路与应用
- ◆ 稳压二极管

掌握：

二极管单向导电性，二极管电路的等效和分析
稳压二极管电路分析。

(5) 稳压管

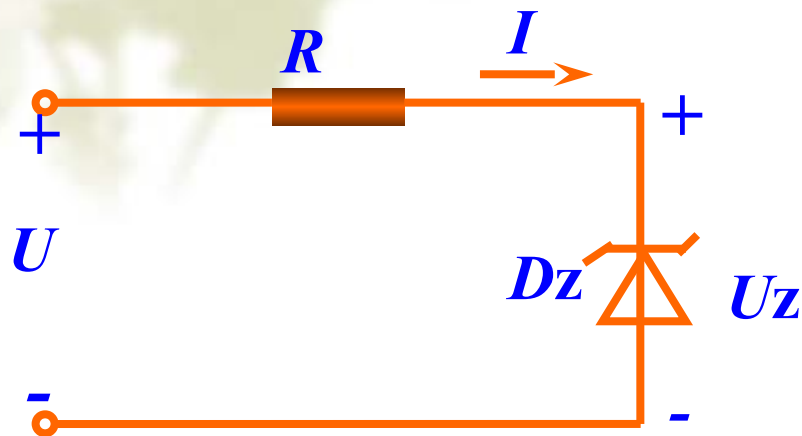
稳压管是一种**特殊**的半导体二极管，它的特殊性在于：当反向电压>击穿电压 U_Z 时，它不但不会损坏，还具有**稳定电压的作用**。用 D_Z 来表示稳压管。



从伏安特性曲线上看，它的正向特性曲线和普通二极管相同，但它的反向特性曲线比较陡，**具有稳压作用**。

(5) 稳压管

注意：为了限制稳压管击穿以后的电流，使用时必须在电路中串联电阻如图所示。



稳压管电路

稳压管的主要参数：

1、稳定电压 U_Z ：等于反向击穿电压 U_{BR} 。

2、最大稳定电流 I_{max} 和最小稳定电流 I_{min} ： (I_Z)

$$I_{min} \leq I \leq I_{max}$$

■ $U < U_Z$ 时，稳压管未击穿，电路不通。

■ $U > U_Z$ 时，稳压管击穿
$$I = \frac{U - U_Z}{R}$$

■ 必须适当选择 R 值，使得 $I_{min} \leq I \leq I_{max}$ 。

■ R 称为限流电阻。

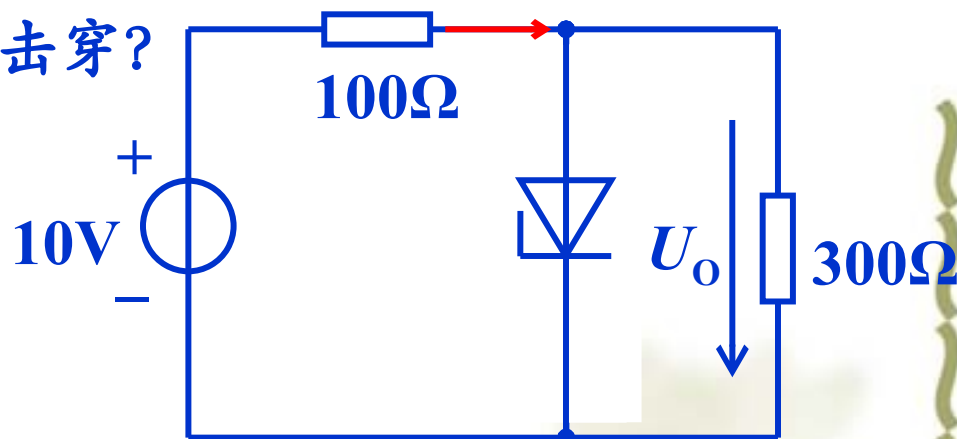
已知：硅稳压管 D_Z 的稳定电压为 $6V$ ，求输出电压 $U_O = ?$

步骤 1：判断稳压管是正偏还是反偏？ 稳压管反偏

步骤 2：判断稳压管是否反向击穿？

如果没有稳压管：

$$U_O = \frac{300}{100 + 300} \times 10 = 7.5 \text{ V}$$



$\because 7.5 \text{ V} > 6 \text{ V} \quad \therefore$ 稳压管 D_Z 被反向击穿

当稳压管 D_Z 被反向击穿后， $U_O = 6 \text{ V}$

思考 1：求此刻的 $I = ?$ $I = \frac{10 - 6}{100} = 0.04 \text{ A}$

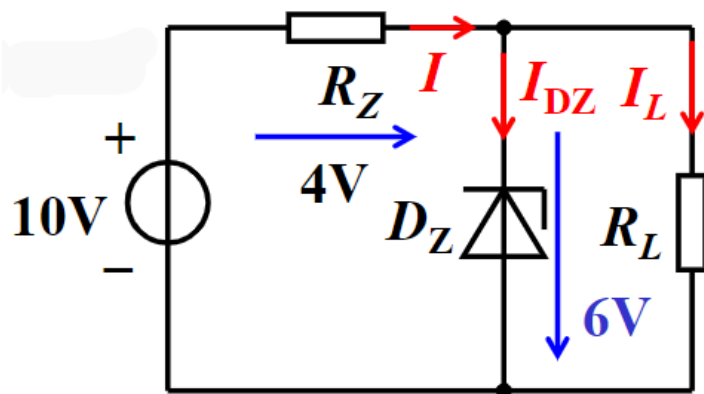
思考 2：求此刻的 $U_O = ?$ 稳压管 D_Z 正向导通， $U_O = 0.7 \text{ V}$

例题2: $R_L = 0.6k\Omega$, D_Z 被反向击穿, 其稳定电压 $U_Z = 6V$, 其工作电流范围为 $10mA < I_{DZ} < 30mA$, 请计算限流电阻 R_Z 的取值范围

$$\because D_Z \text{ 被反向击穿} \therefore I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{6}{0.6k} = 10mA$$

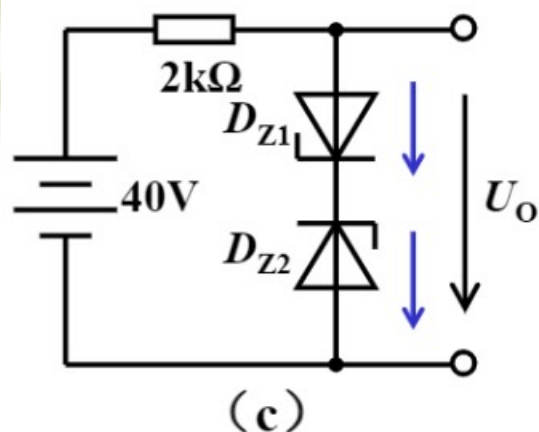
$$KCL: I = I_{DZ} + I_L \rightarrow 20mA < I < 40mA$$

$$0.1k\Omega = \frac{4}{40mA} < R_Z < \frac{4}{20mA} = 0.2k\Omega$$



4-5: 硅稳压管 $U_{Z1}=7V$ 、 $U_{Z2}=13V$ ， $I_Z=5mA$ ，求 $U_O=?$

步骤1: 判断 D_Z 是正偏还是反偏？ 步骤2: 判断 D_Z 是否反向击穿？

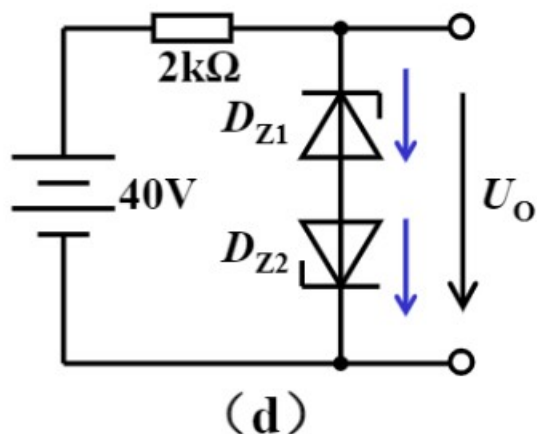


D_{Z1} 正偏， D_{Z2} 反偏；

D_{Z1} 和 D_{Z2} 串联，需要 $13.7V$ 才能让 D_{Z1} 正向导通， D_{Z2} 反向击穿

$$\because 40V > 13.7V \quad \therefore U_O = 0.7 + 13 = 13.7V$$

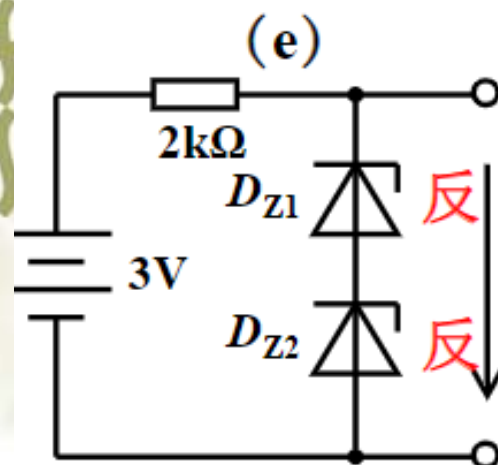
$$I = \frac{40 - 13.7}{2k} = 13.15mA > I_Z \rightarrow \text{反向击穿稳定}$$



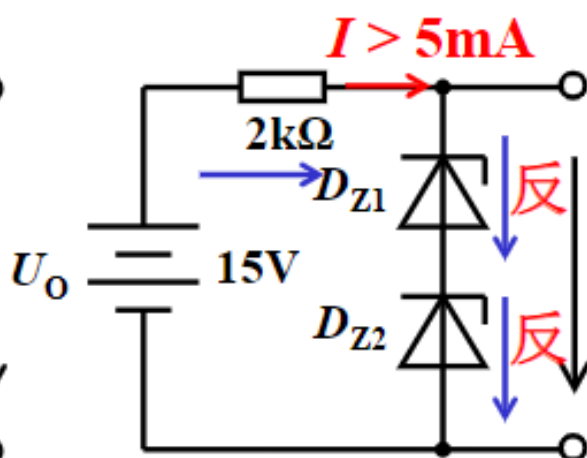
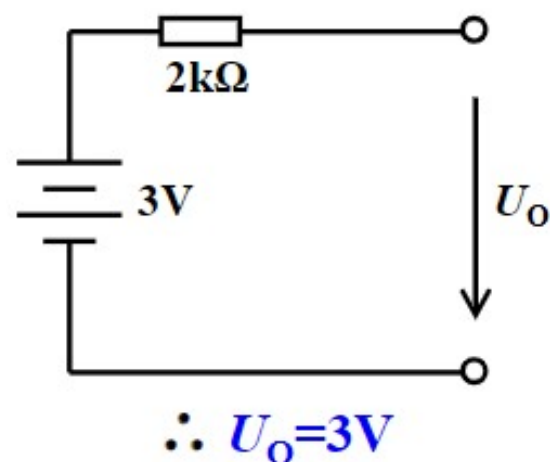
D_{Z1} 反偏， D_{Z2} 正偏；

D_{Z1} 和 D_{Z2} 串联，需要 $7.7V$ 才能让 D_{Z1} 反向击穿， D_{Z2} 正向导通

$$\because 40V > 7.7V \quad \therefore U_O = 7 + 0.7 = 7.7V$$



$\because D_{Z1}$ 和 D_{Z2} 都处于反向截止状态



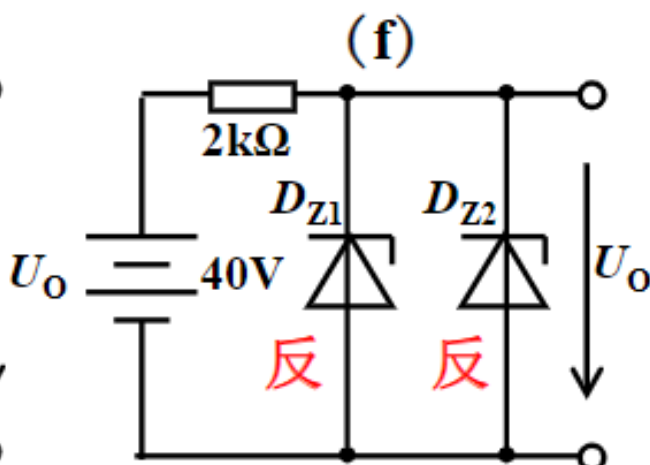
$\because D_{Z1}$ 和 D_{Z2} 是串联
只要一个反向截止
该支路都不起作用

$$\therefore U_O = 15V$$

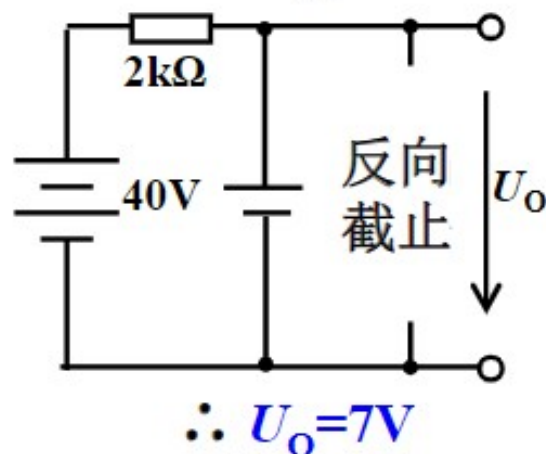
若同时反向击穿至少需要多大电压?

$$U_S > 2 \times 5 + 7 + 13 = 30V$$

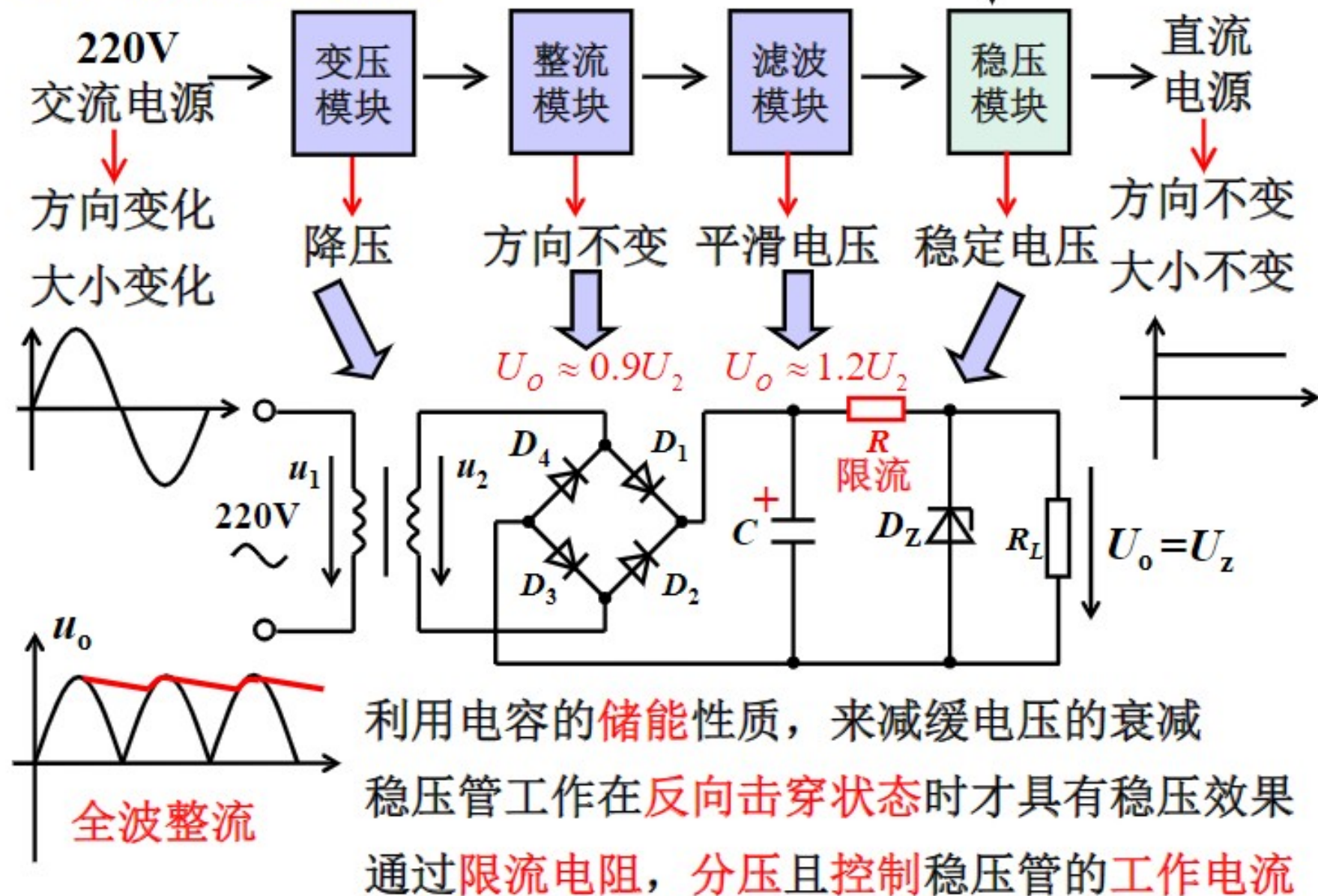
图(a)的40V可满足



$\because D_{Z1}$ 和 D_{Z2} 是并联
看谁先被反向击穿
 $\because 7 < 13 \therefore D_{Z1}$ 先击穿

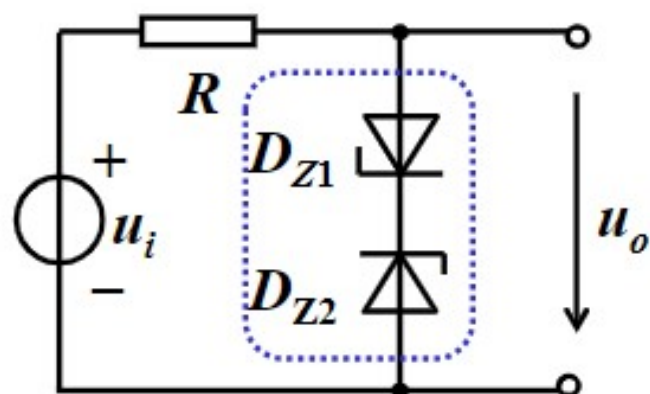


三、稳压管的应用

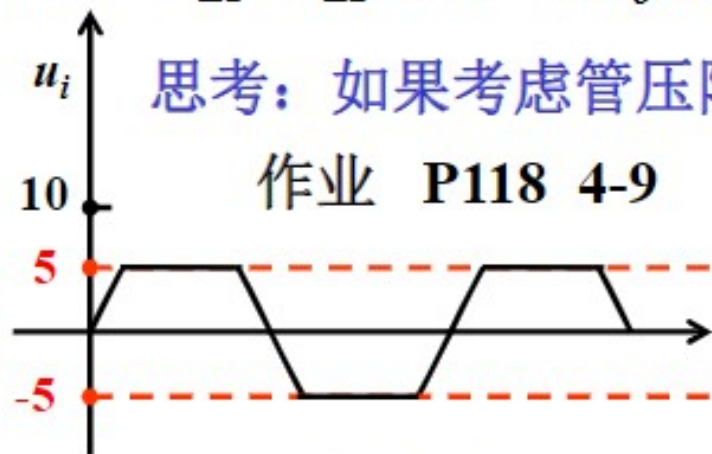


三、稳压管的应用 → 作为限幅器 与二极管限幅的区别？

已知： $u_i = 10\sin\omega t$, D_{Z1} 、 D_{Z2} 为理想, $U_{Z1} = U_{Z2} = 5V$, 求 u_o 波形



开关
+
恒压源



思考：如果考虑管压降？

作业 P118 4-9

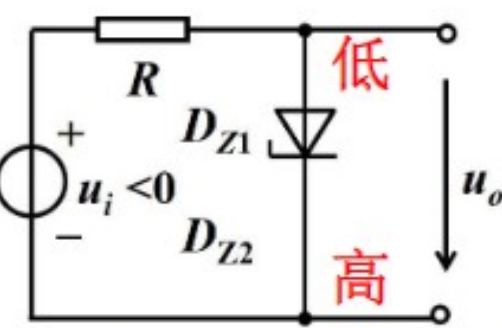
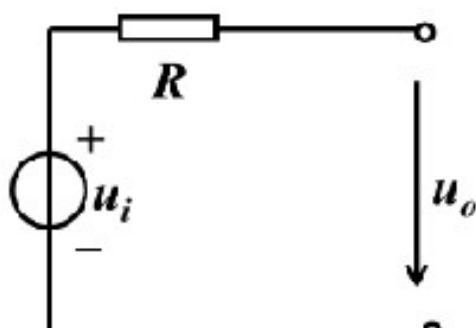
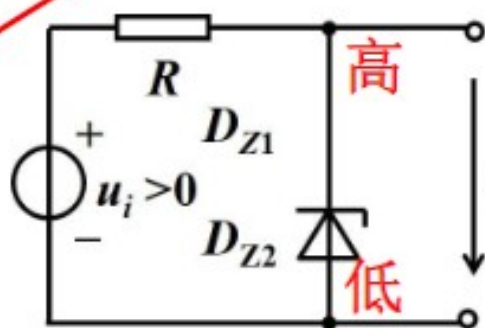
两个稳压管串联且方向相反

一个正偏时，另一个必然反偏

$u_i > 5V \rightarrow D_{Z2}$ 反向击穿 $\rightarrow U_o = 5V$

$u_i < -5V \rightarrow D_{Z1}$ 反向击穿 $\rightarrow U_o = -5V$

一根导线

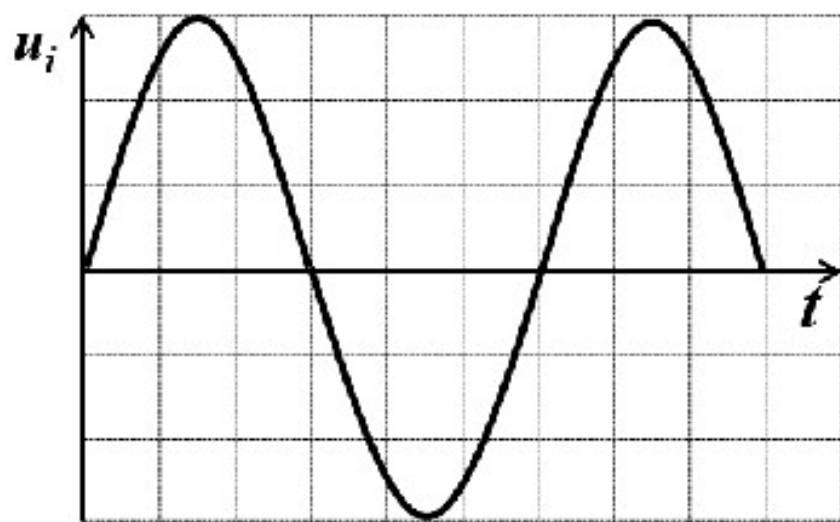
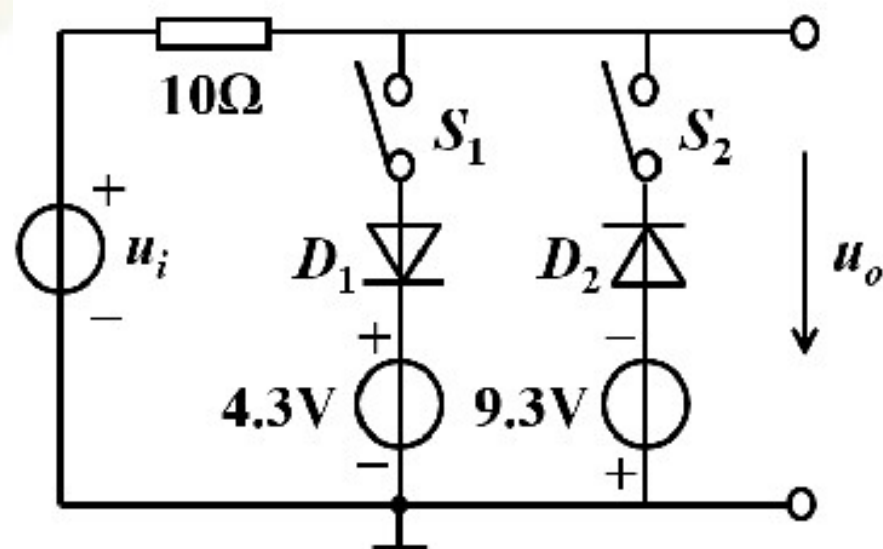


当 $0 < u_i \leq 5$ 时 D_{Z2} 反止(断) $\rightarrow u_o = u_i \leftarrow$ 当 $-5 \leq u_i < 0$ 时 D_{Z1} 反止(断)

作 业

P116 4-5 ; P118 4-9 实验二：稳压管限幅电路设计

假设 $u_i = 15\sin\omega t$, D_1 、 D_2 为硅普通二极管 ($U_D = 0.7V$) ,



要求：请用硅稳压管设计出与S1和S2均闭合相同效果的电路，画出电路图（限流电阻取 250Ω ），并进行分析。

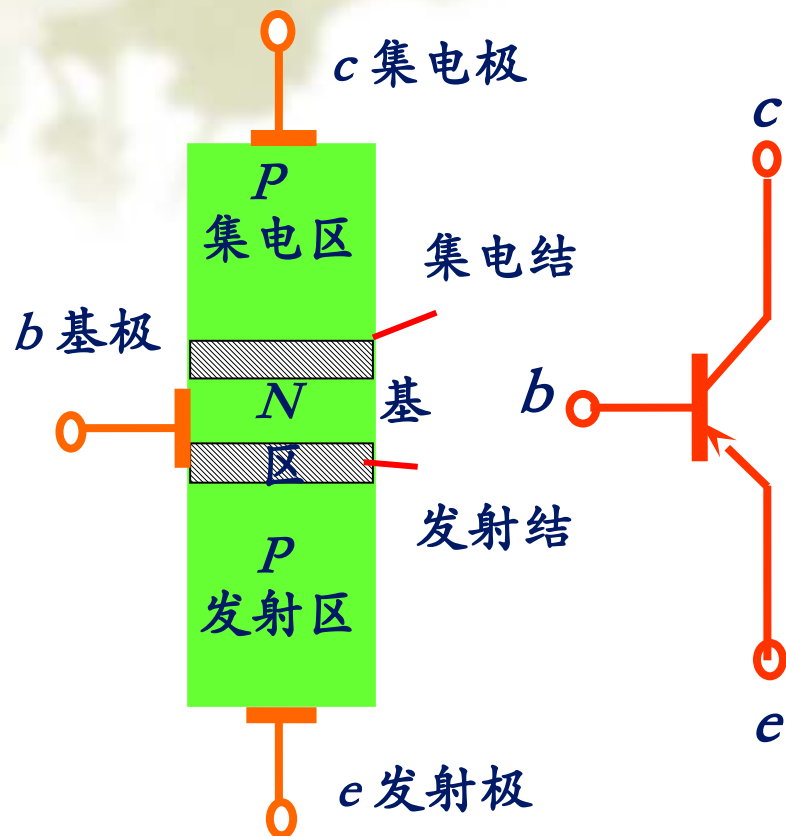
将设计图和分析过程写在作业纸上，带到实验室进行仿真验证



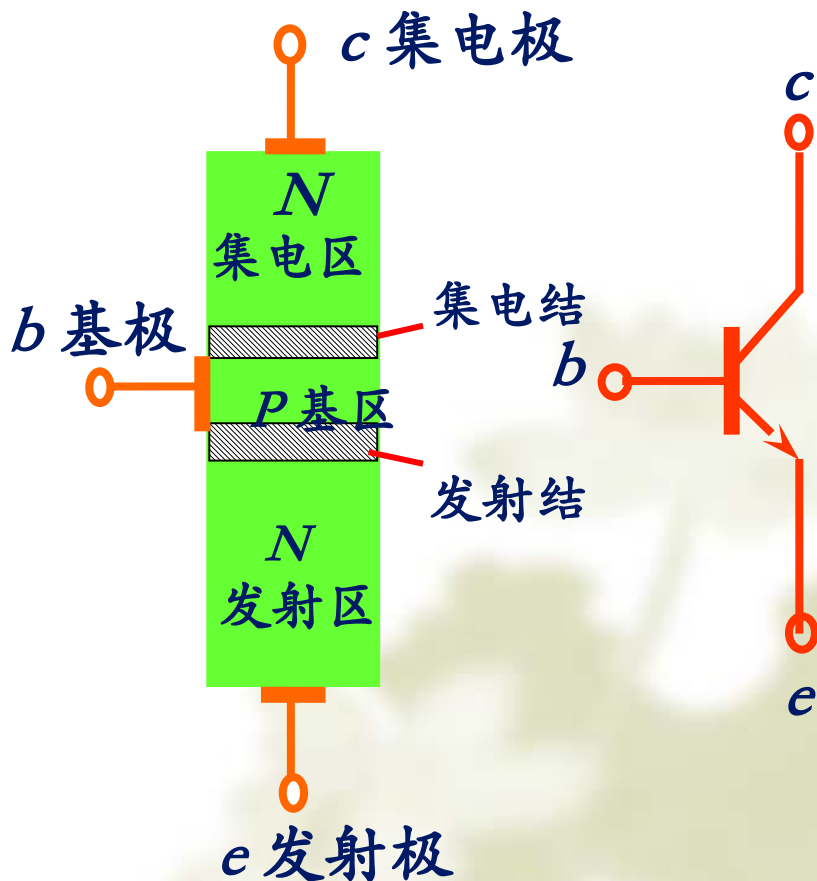
作业： 4.1 到 4-10

(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。

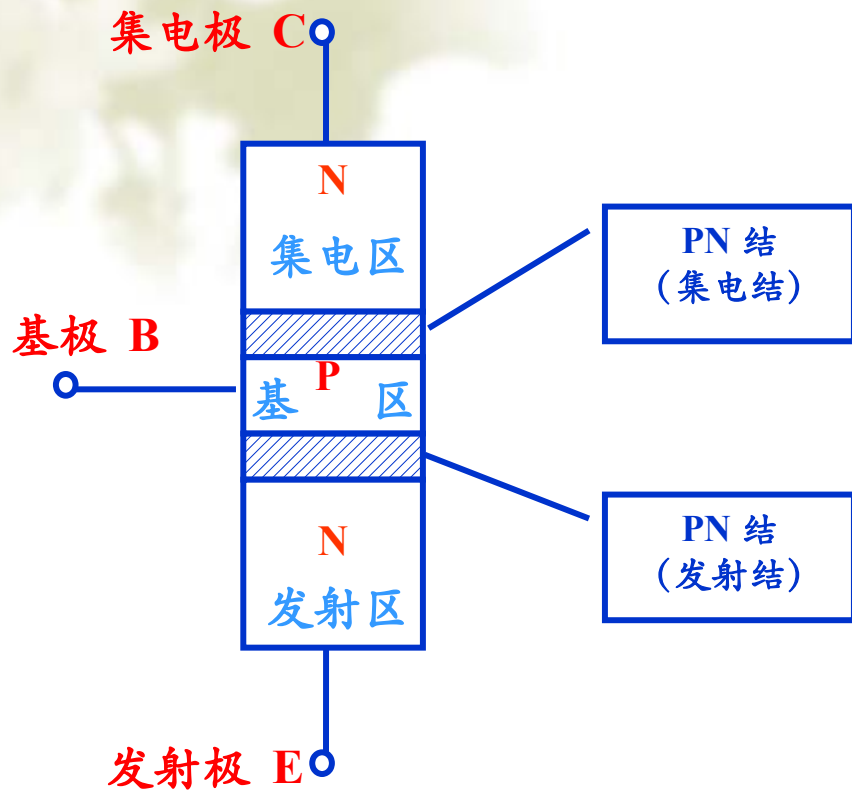
放大内部条件：

- 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

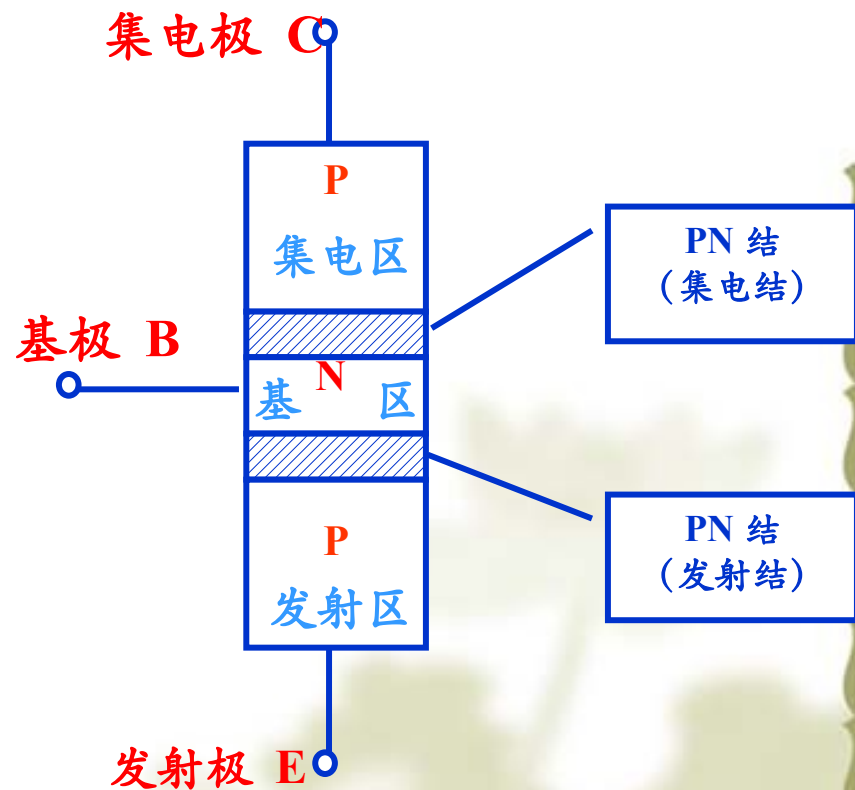
NPN 型三极管



$$V_C > V_B > V_E$$

电流放大作用

PNP 型三极管



$$V_E > V_B > V_C$$

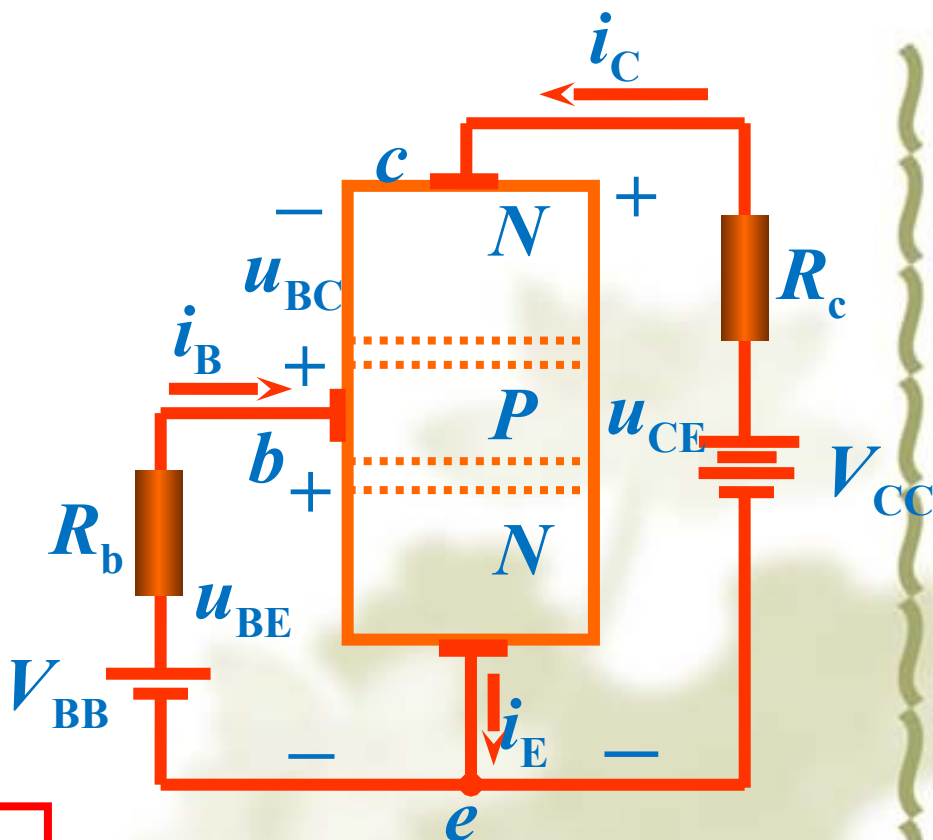
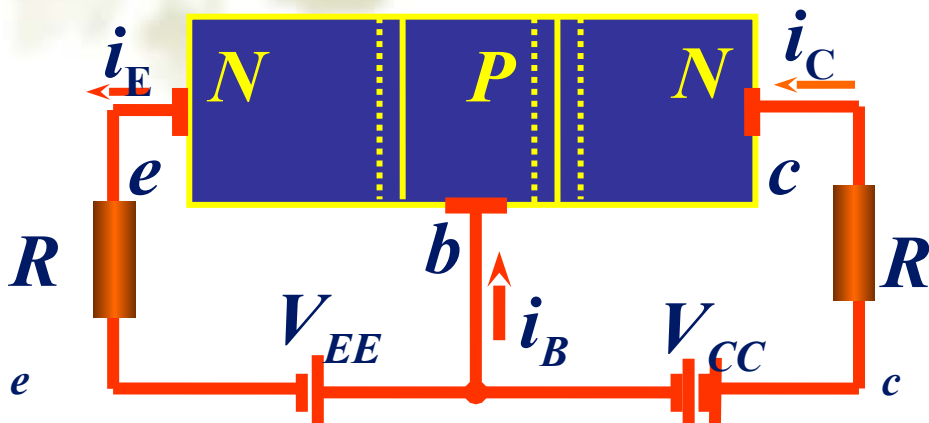
发射结正偏，集电结反偏

(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

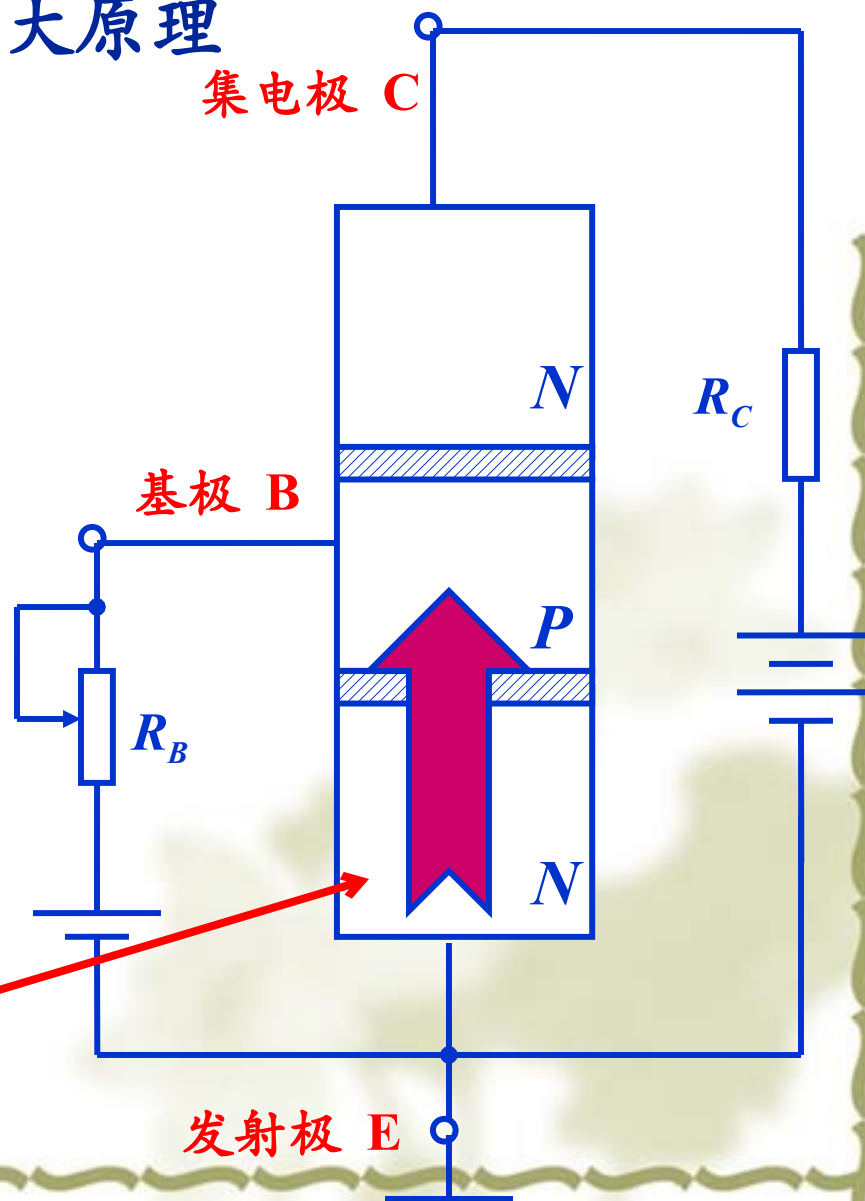
发射结正偏，集电结反偏

↓
 $V_C > V_B > V_E$

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。



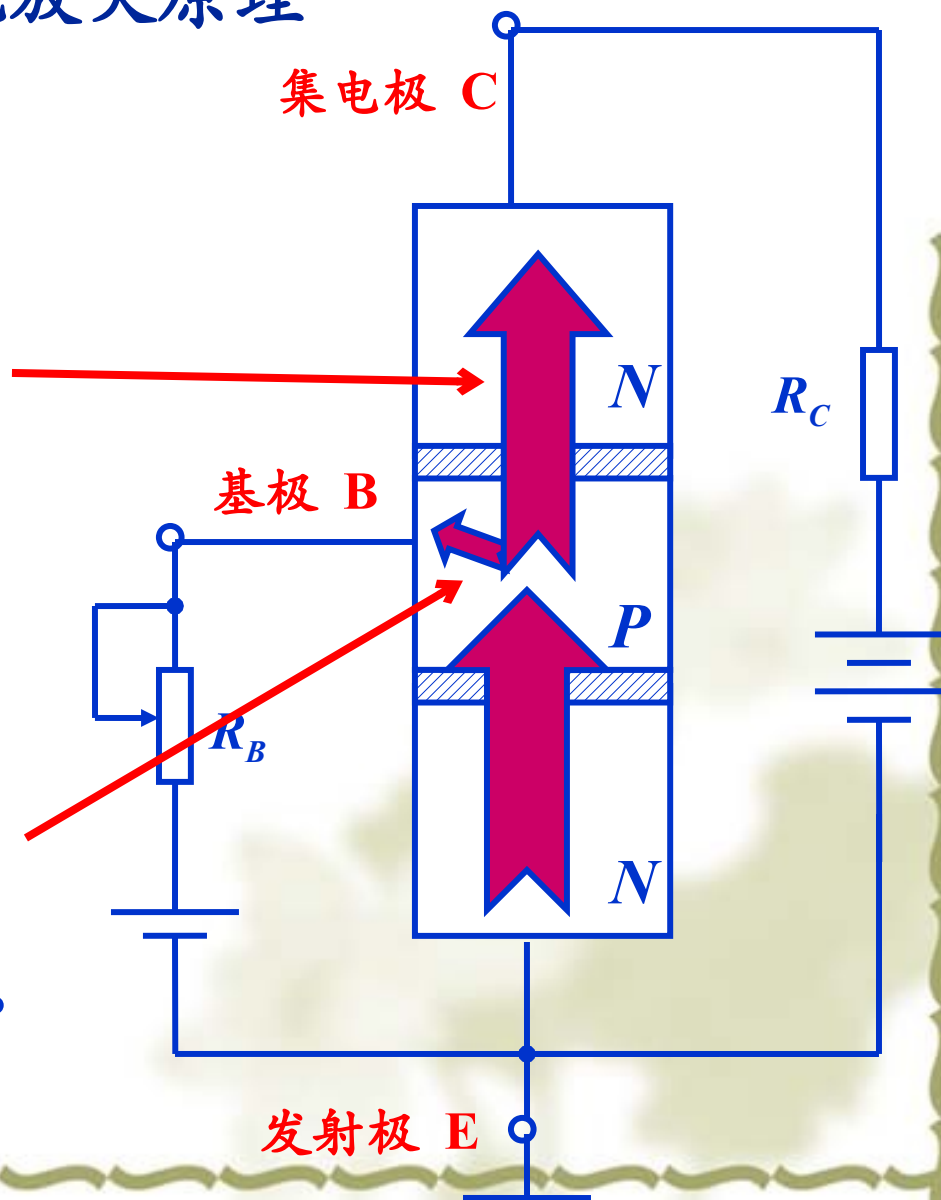
(2) 半导体放大作用

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。

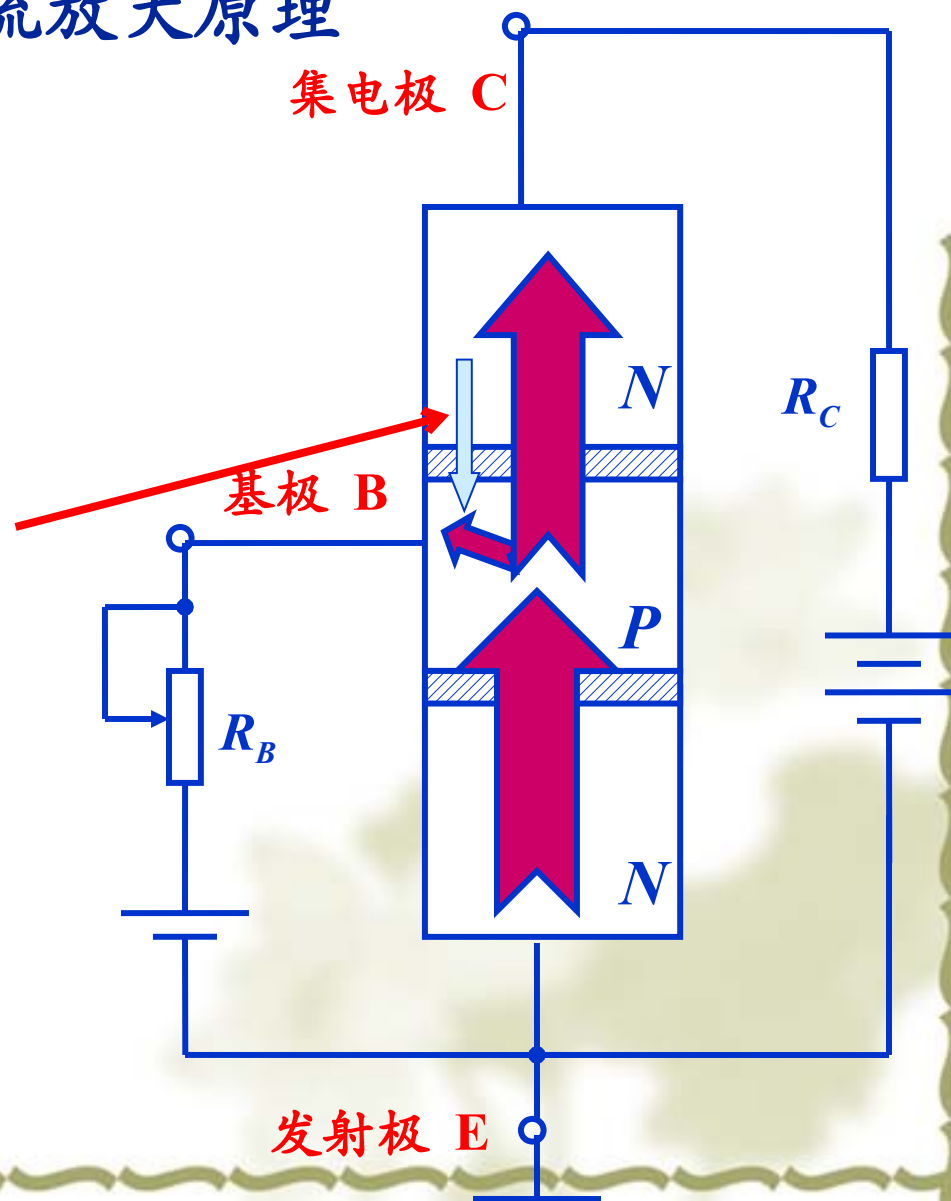


(2) 半导体放大作用

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

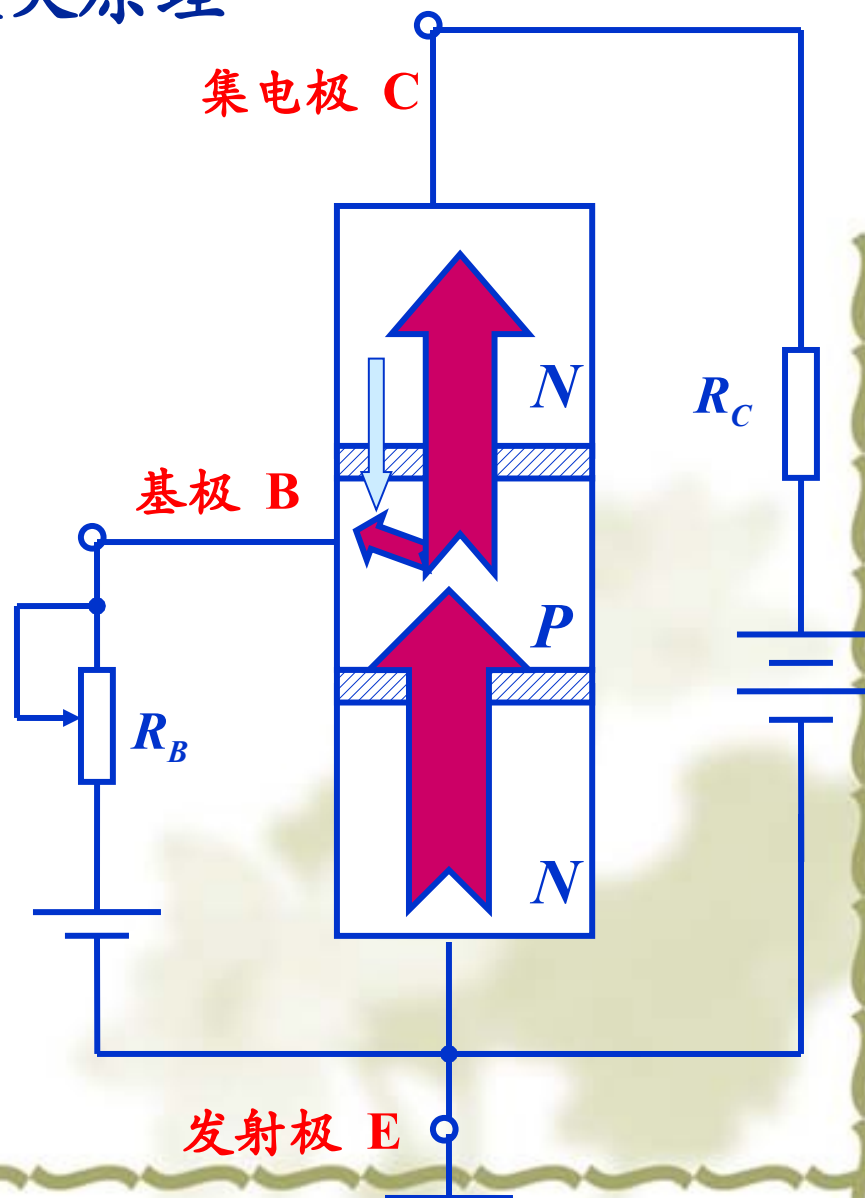


$$V_C > V_B > V_E$$

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：

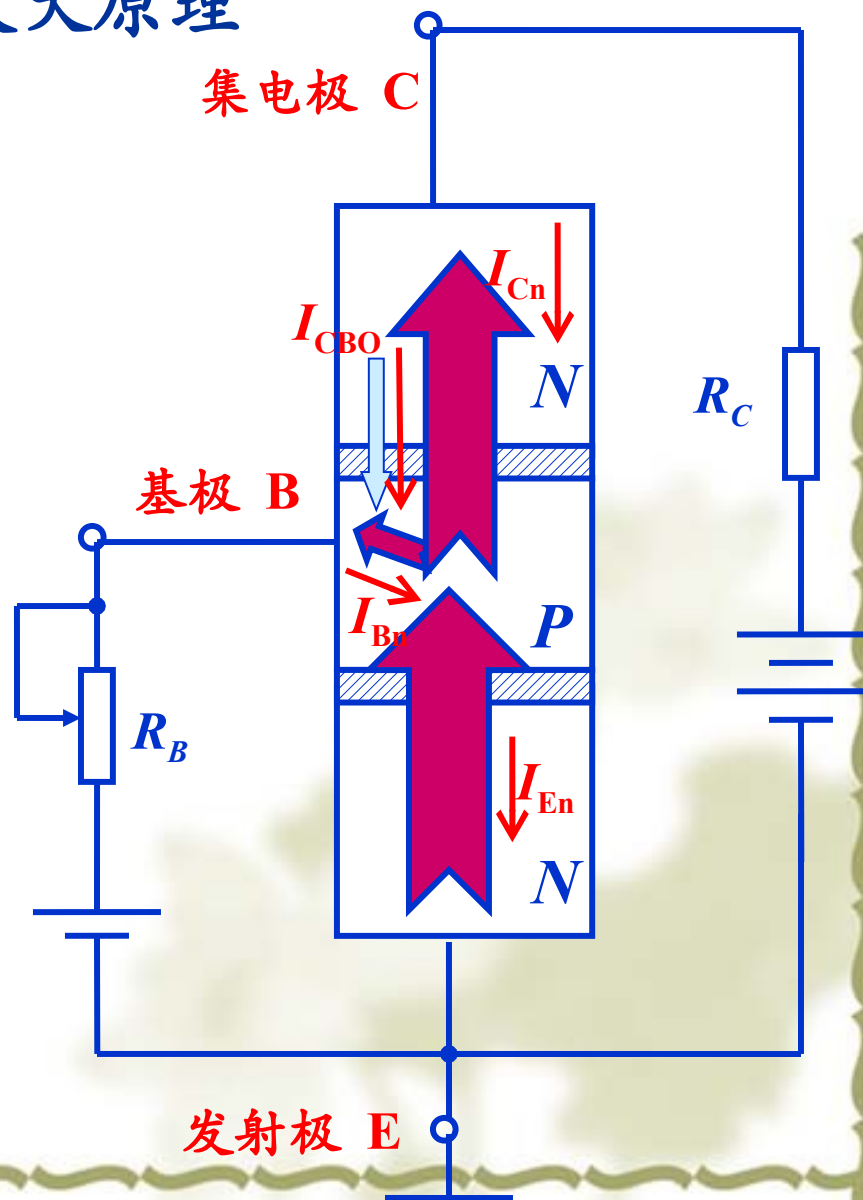
$$1、I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

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

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

直流电流放大倍数

当三极管制造好后， $\bar{\beta}$
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：

$$1、I_{En} = I_{Bn} + I_{Cn}$$

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

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

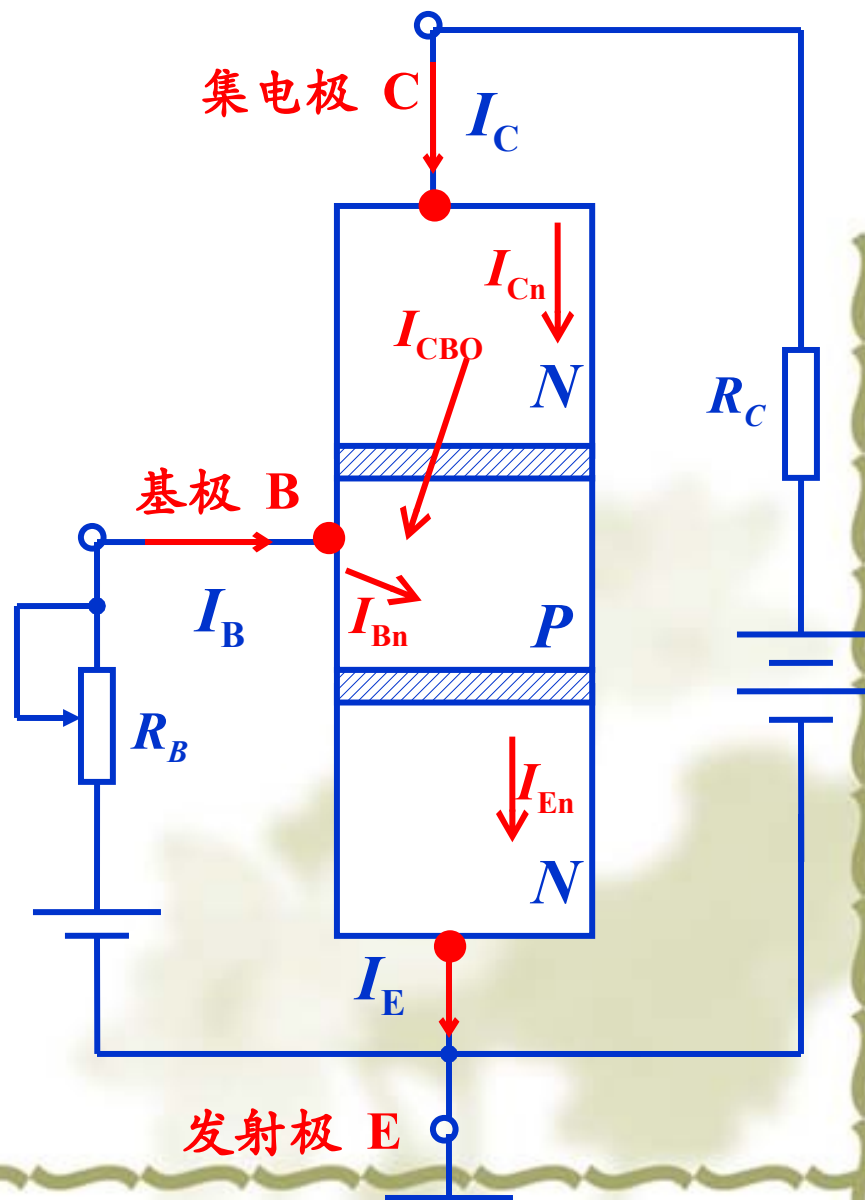
问题： I_E 、 I_C 、 $I_B = ? \rightarrow$ KCL

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

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

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

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

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

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

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

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

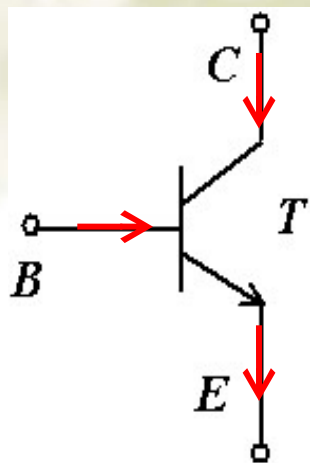
穿透电流 \rightarrow 很小

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

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

一、NPN 型三极管的电流放大原理

发射结正偏，集电结反偏



NPN

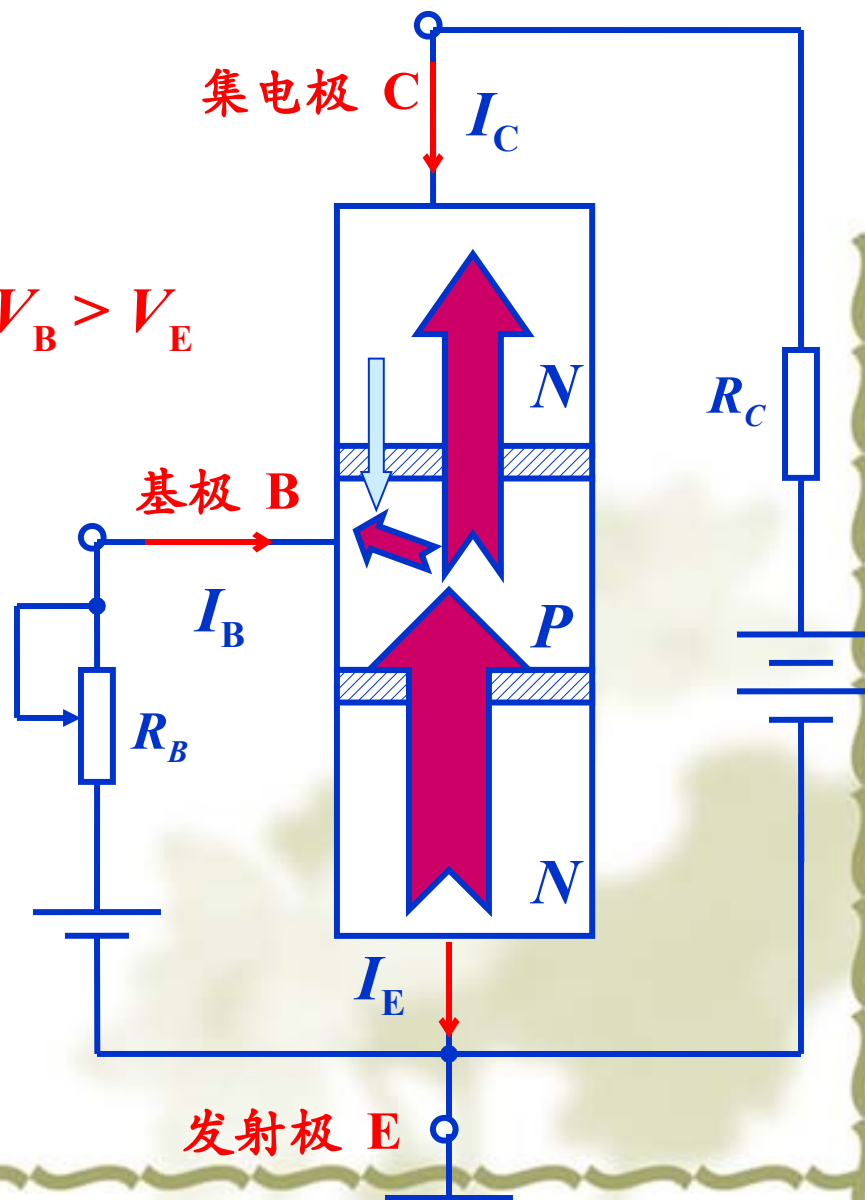
$$V_C > V_B > V_E$$

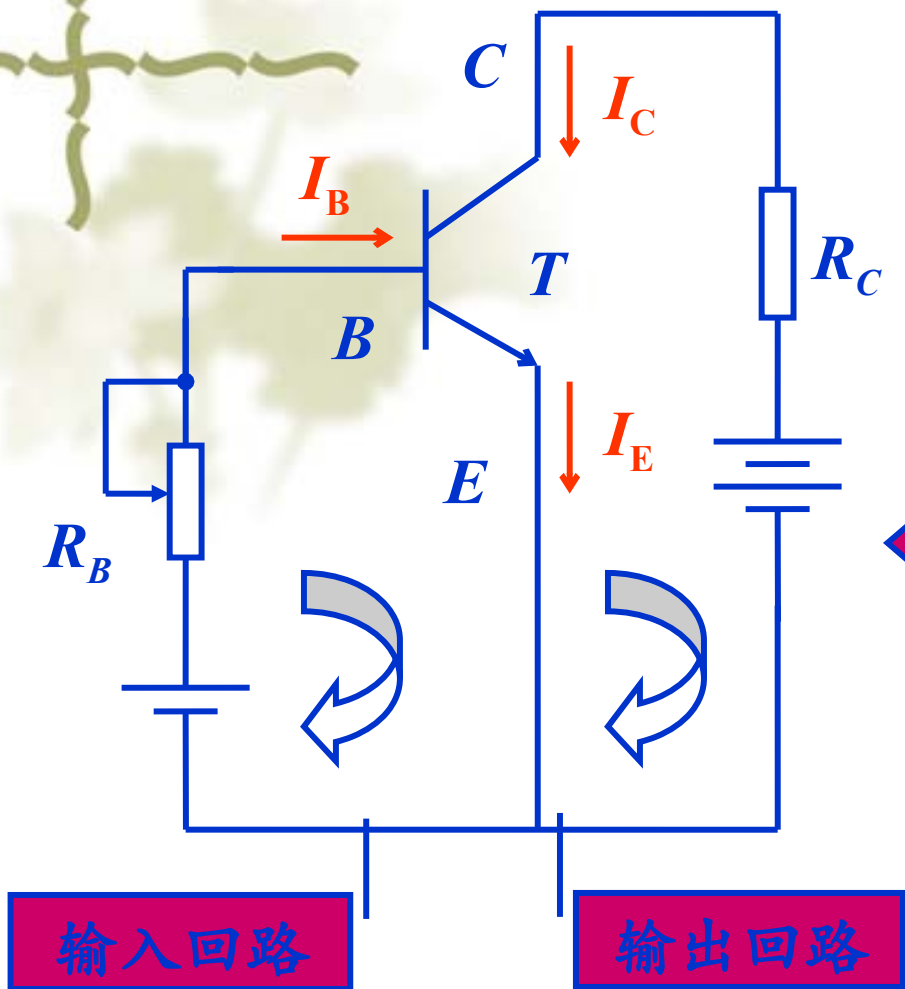
$$1、I_E = I_B + I_C \approx (1 + \bar{\beta}) I_B$$

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

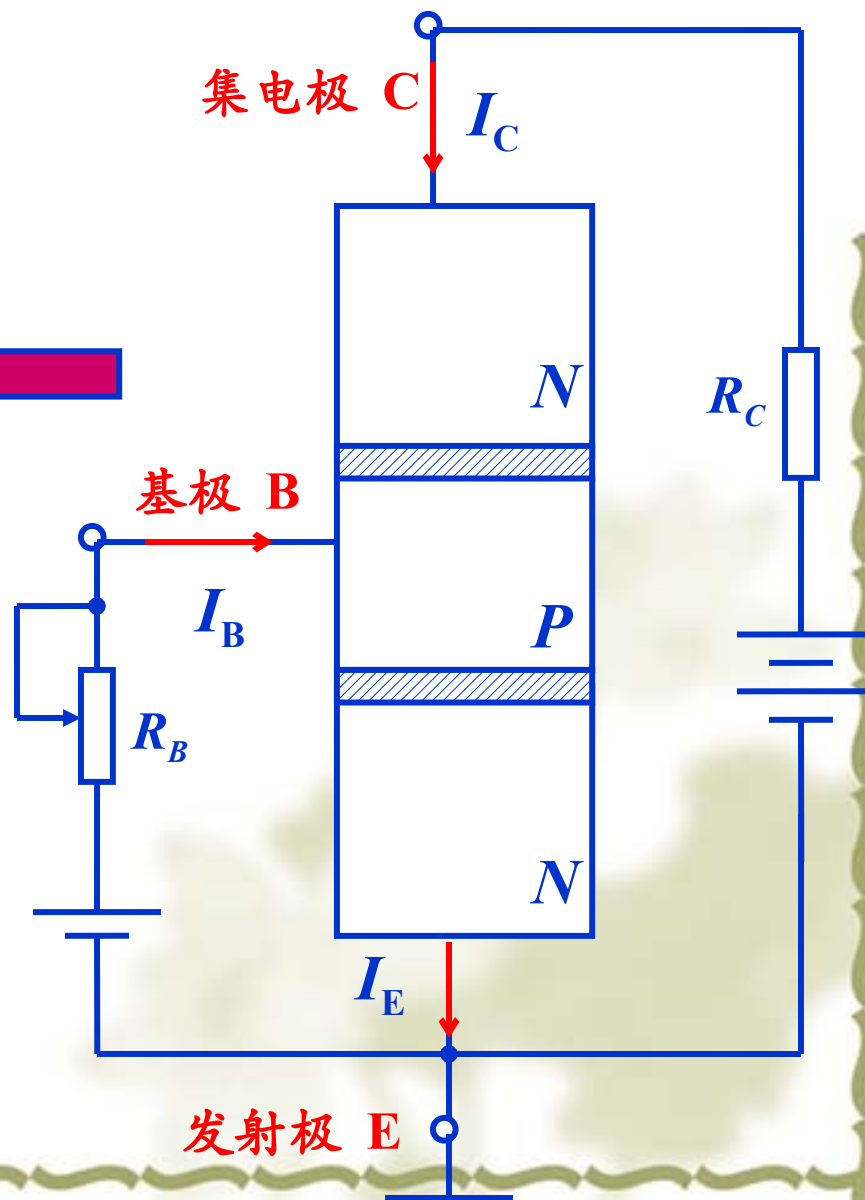
$$3、\frac{I_C}{I_B} \approx \bar{\beta} \gg 1 \rightarrow \text{常数}$$

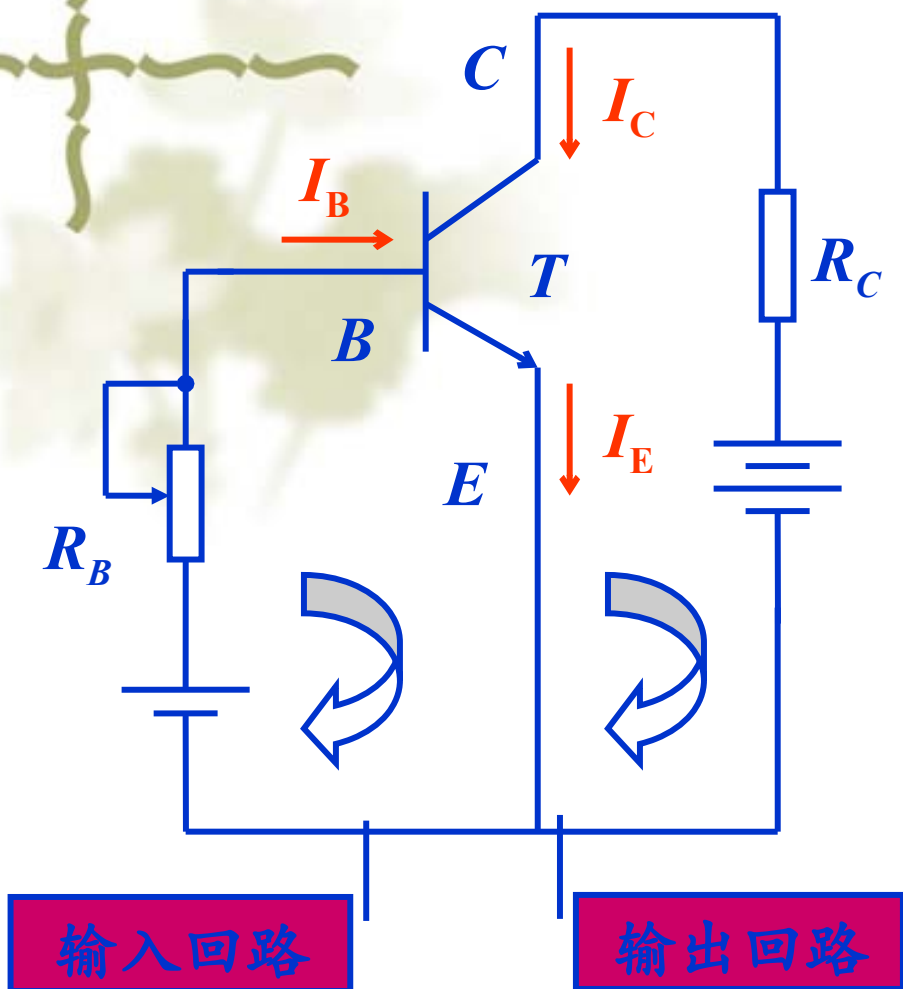
直流电流放大倍数





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。

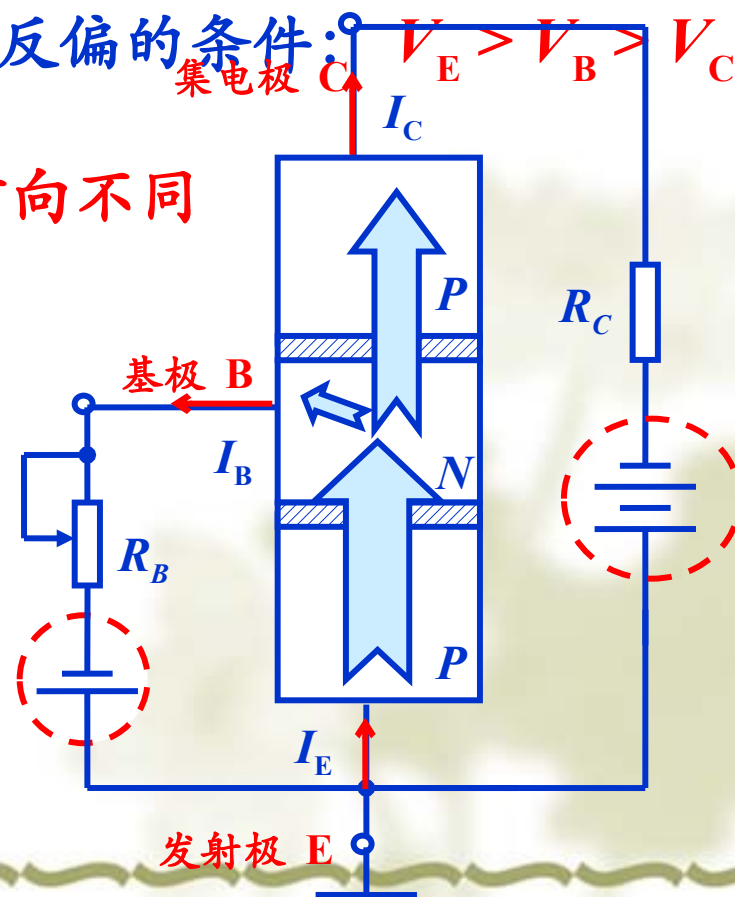
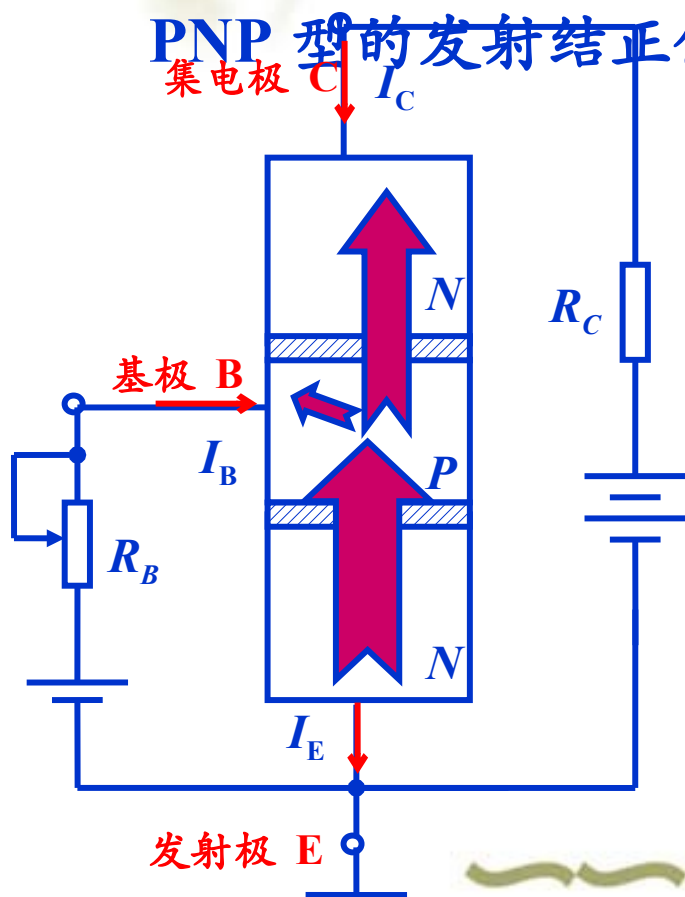
二、PNP 型三极管的电流放大原理

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

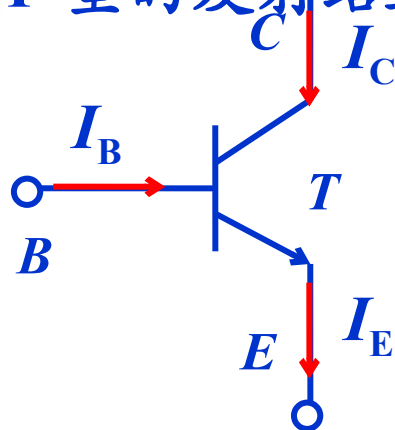


二、PNP 型三极管的电流放大原理

PNP 型三极管的工作原理和 NPN 型非常类似，区别点有两点：

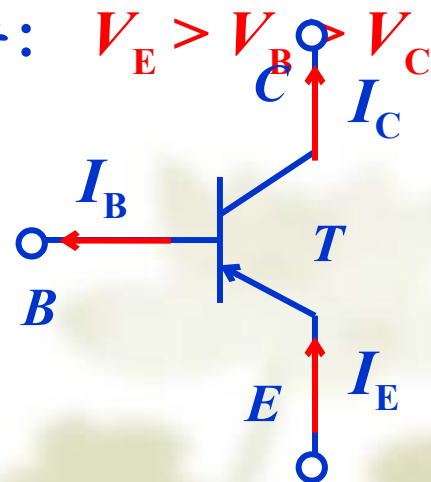
1、NPN 型的发射结正偏，集电结反偏的条件： $V_C > V_B > V_E$

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



NPN 型三极管

2、电流方向不同

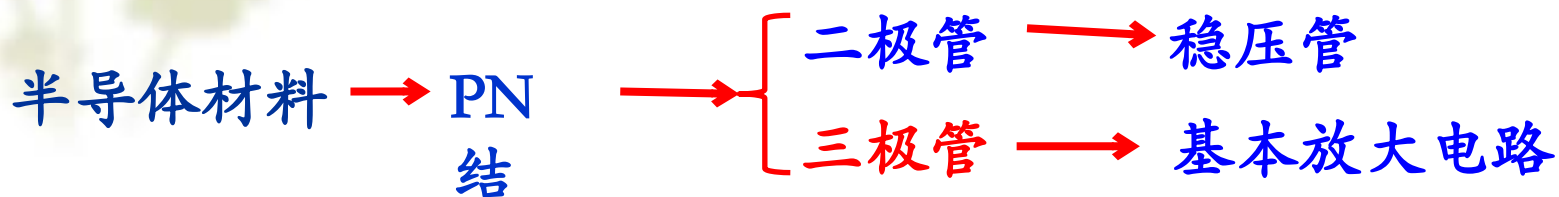


PNP 型三极管

$\bar{\beta} \gg 1$ 常数
↑

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

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
- ◆ 三极管的特性曲线
- ◆ 三极管的参数
- ◆ 温度对三极管的影响