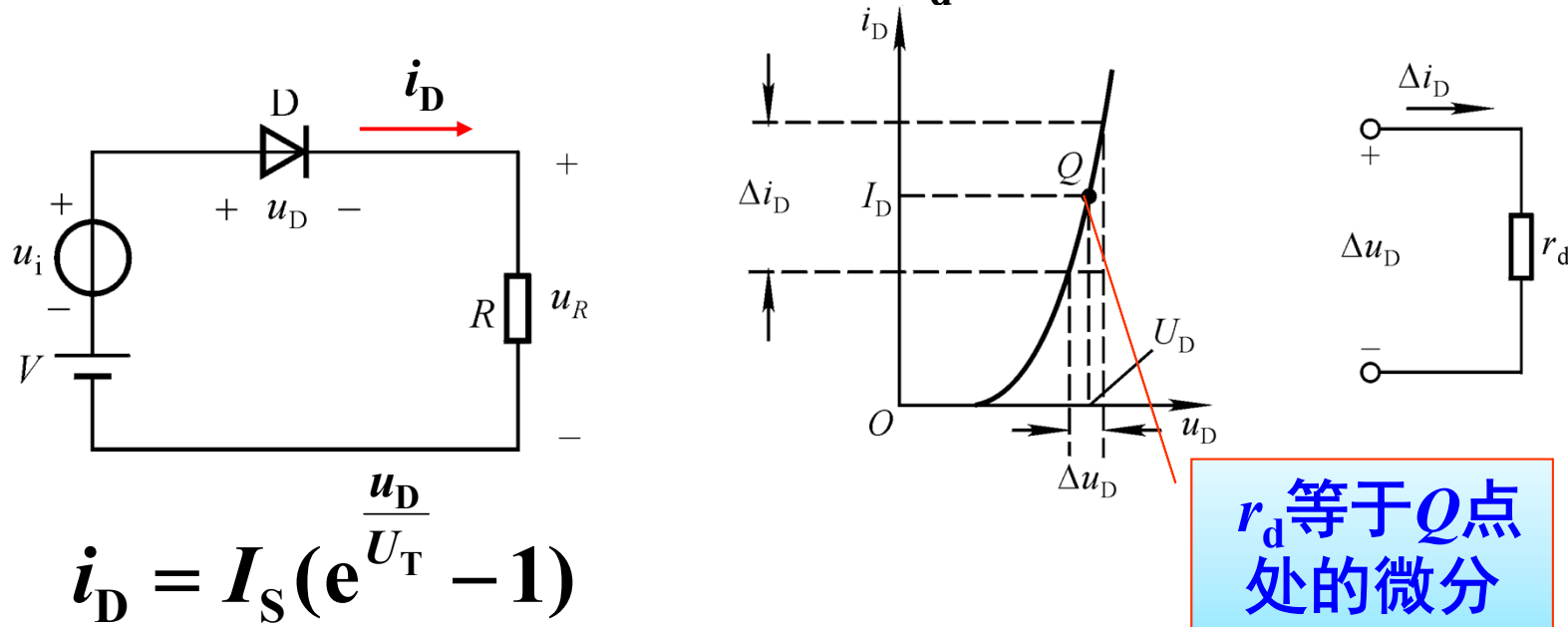


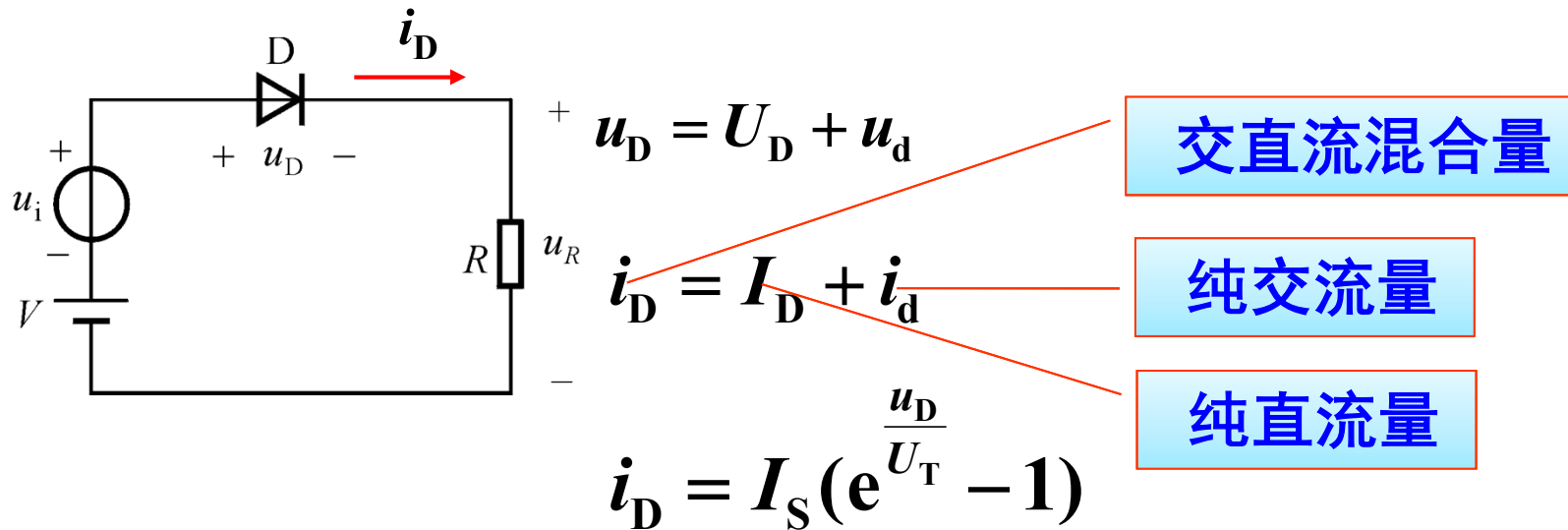
2. 微变等效电路(AC Equivalent Circuit)

二极管两端电压在某一直流值上叠加一个微小交流信号时，等效为电阻 r_d 。

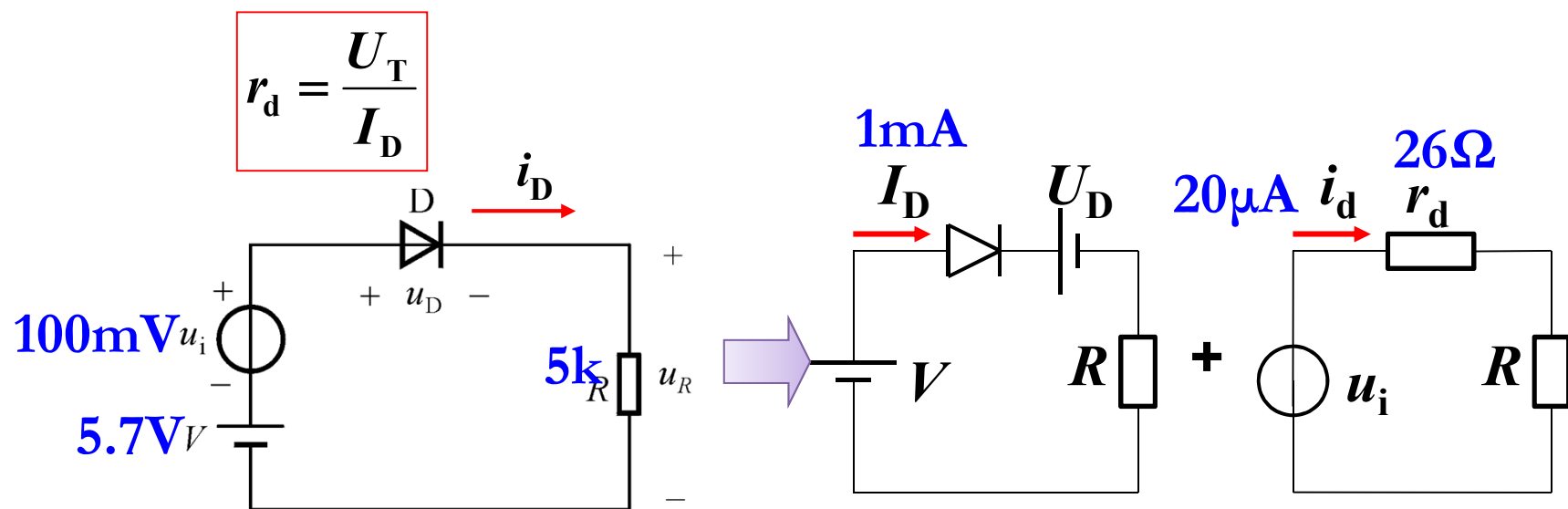


$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{du_D}{di_D} = \frac{1}{\frac{di_D}{du_D}} \approx \frac{1}{\frac{I_S}{U_T} \cdot e^{\frac{u_D}{U_T}}} \approx \frac{U_T}{I_D}$$

2. 微变等效电路(AC Equivalent Circuit)



$$\begin{aligned}
 I_D + i_d &= I_S (e^{\frac{U_D + u_d}{U_T}} - 1) \approx I_S e^{\frac{U_D + u_d}{U_T}} \quad (1/r_d) \\
 &\approx I_S e^{\frac{U_D}{U_T}} e^{\frac{u_d}{U_T}} \approx I_D (1 + \frac{u_d}{U_T}) \approx I_D + \frac{I_D}{U_T} u_d
 \end{aligned}$$



$$V + u_i = u_D + i_D \cdot R$$

$$= (U_D + u_d) + (I_D + i_d) \cdot R$$

$$V = U_D + I_D \cdot R$$

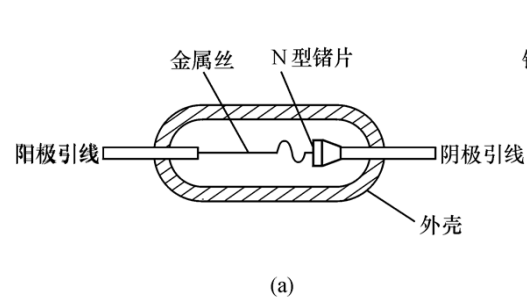
$$u_i = u_d + i_d \cdot R = i_d \cdot r_d + i_d \cdot R$$

当直流电源和交流小信号源共同作用时，直流电源和交流小信号源的作用应分开分析。

五、二极管的主要参数(Parameters)(自学)

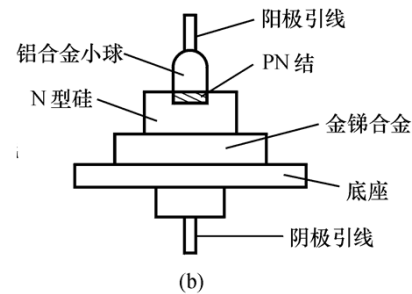
- 最大整流电流 I_F : 最大正向电流平均值
- 最大反向工作电压 U_R : 最大瞬时值, 等于 $1/2 U_{(BR)}$
- 反向电流 I_R : 即 I_S
- 结电容 $C_j = C_b + C_d$
 - (1) 势垒电容 C_b
 - (2) 扩散电容 C_d只有当二极管工作在高频时才考虑这两种电容
- 最高工作频率 f_M : 因PN结有电容效应

六、二极管结构及分类（自学）



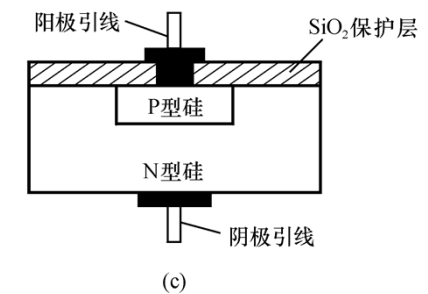
(a)
点接触型

结面积小，结电容小
适于高频电路和小功率整流



(b)
面接触型

结面积大，结电容大
仅作为整流管



(c)
平面型

结面积大的用于大功率整流
结面积小的用作开关管

六、二极管结构及分类（自学）

按照所用半导体材料：分为锗（*Ge*）管、硅（*Si*）管、砷化镓（*GaAs*）管等；

按照用途：分为稳压二极管、开关二极管、整流二极管、检波二极管等；

按照管芯结构：分为点接触型二极管、面接触型二极管、平面型二极管；

根据特点：

发光二极管LED：一般用 *GaP*制作，用于显示、照明，或激光LED

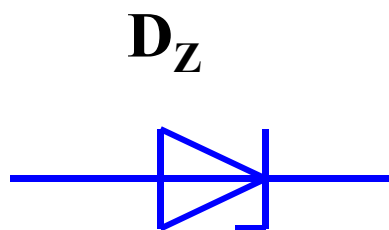
光电二极管：一般用 *GaP*制作，用于光纤通信、CD-ROM、激光打印等；用*Si*制作的 Solar Cell

肖特基二极管：用于数字开关，速度快、导通电压小
变容二极管、隧道二极管等。

七、稳压二极管 (Zener Diode)

稳压二极管又称为齐纳二极管或简称稳压管

1. 符号

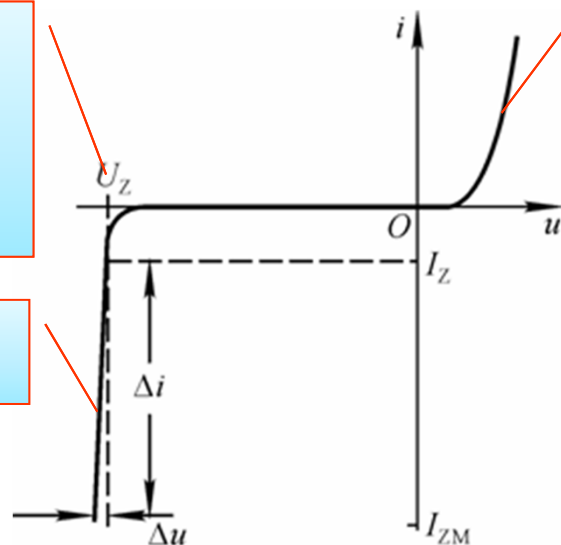


2. 伏安特性

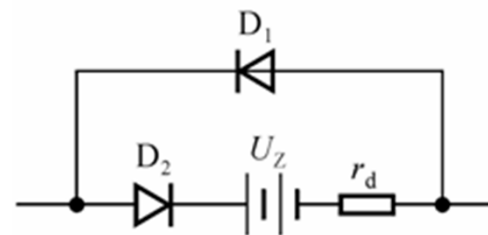
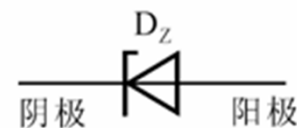
稳压管外加反向击穿电压时，在一定条件下并不会损坏，而具有稳压的作用。

反向击穿
时具有稳
压作用

斜率= $1/r_z$



正向部分与普
遍二极管相同



反向击穿时只在一定电流范围内稳压，且稳定电压 U_Z 不是恒定不变。

主要参数：

- 稳定电压 U_Z
- 稳定电流 I_Z
- 最大稳定电流 I_{ZM}
- 额定功耗 $P_{ZM}=U_Z \cdot I_{ZM}$

- 动态电阻 r_z
 $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$
约为 $5 \sim 200 \Omega$
- 温度系数 T_C
 $T_C = \Delta U_Z / \Delta T$



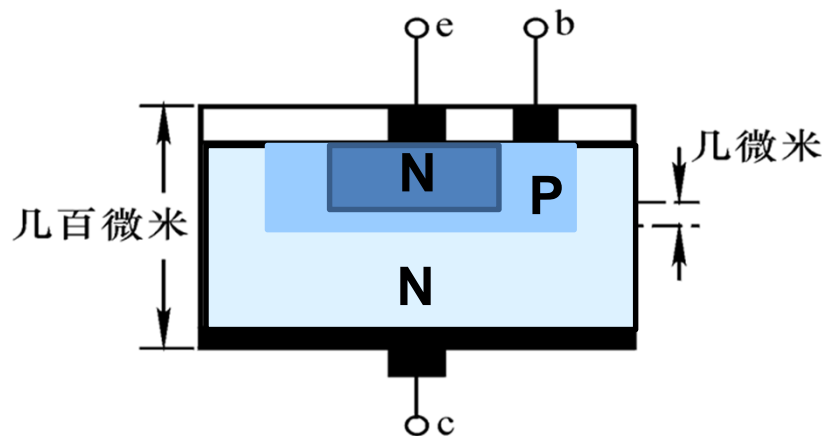
1.4 双极型晶体管

(Bipolar Junction Transistor)

简称为晶体管或三极管，具有电流放大作用。

一、结构和符号

用不同的掺杂方式在同一硅片上制造出**三个区**，形成**两个PN结**，引出**三个电极**，就构成了晶体管。

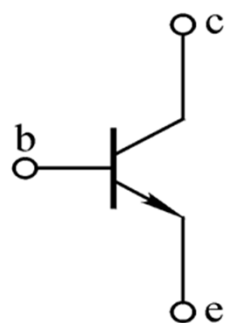


晶体管三个区的特点：

- 发射区的**掺杂浓度很高**
- 基区**很薄**，一般为1至几微米（分立元件）
- 集电结**面积大**

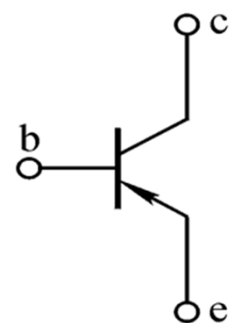
晶体管分为NPN型管和PNP型两种

符号



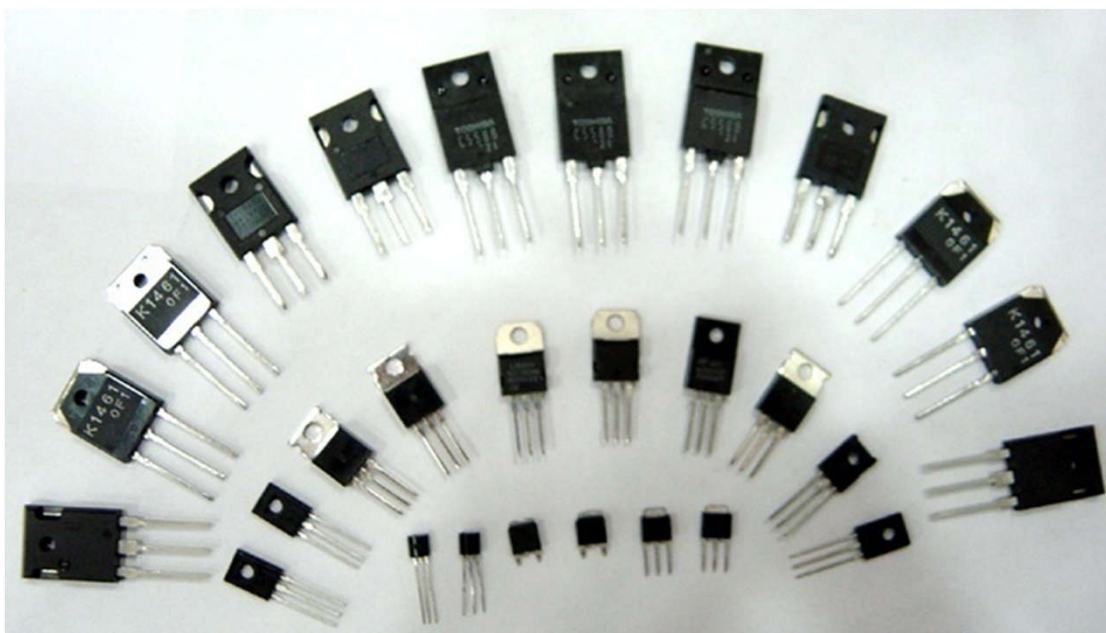
NPN型

NPN型



PNP型

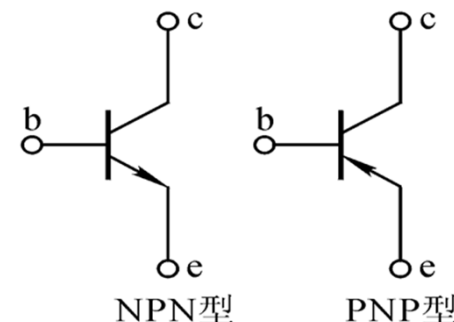
PNP型



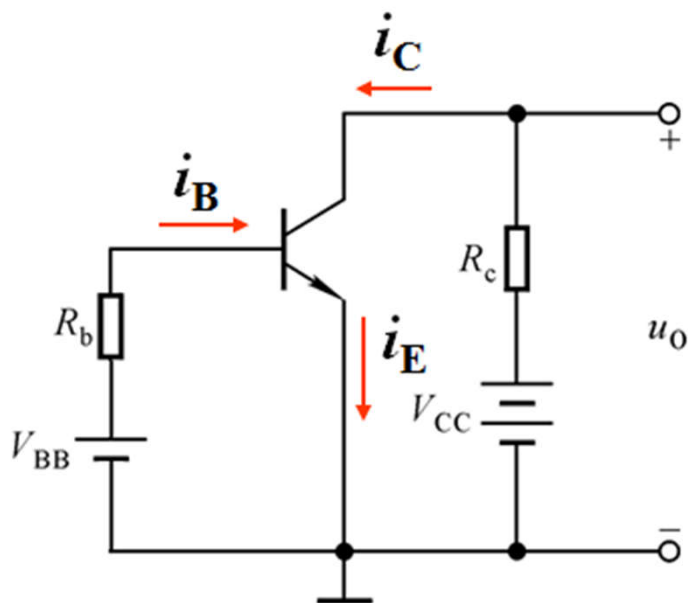
二、晶体管的放大原理

1. 四种工作状态(Operation modes)

- 发射结和集电结均反偏-截止(Cutoff)状态
- 发射结和集电结均正偏-饱和(Saturation)状态
- 发射结正偏、集电结反偏-放大(Forward-active)状态
- 发射结反偏、集电结正偏-倒置(Reverse-active)状态

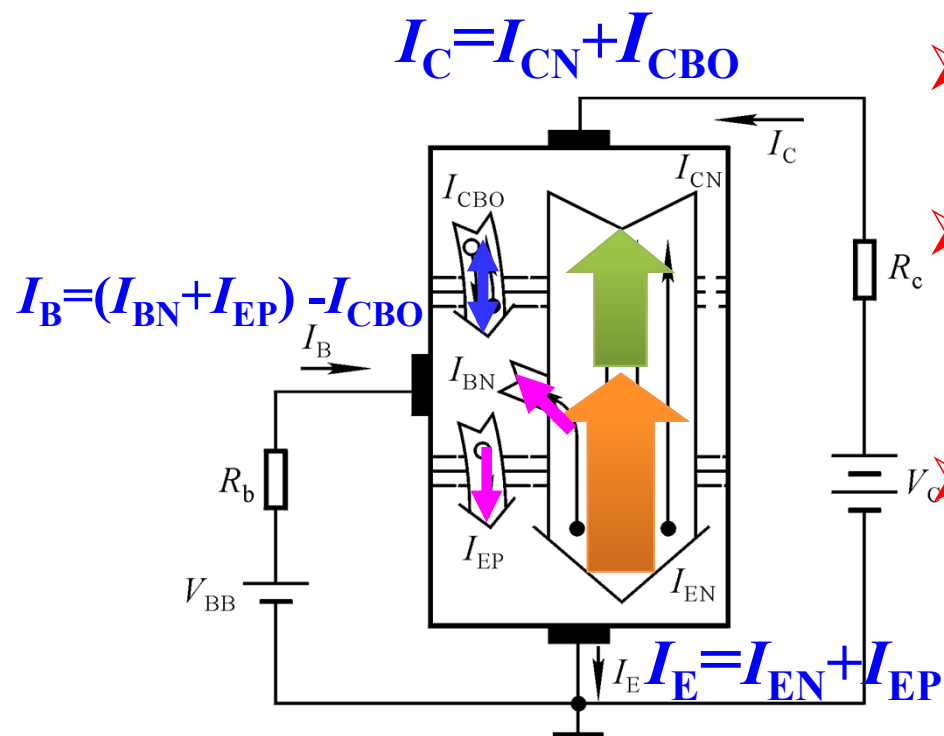


2. 放大原理



V_{BB} 、 V_{CC} 分别保证发射结正偏、集电结反偏，即保证晶体管处于放大状态。

当晶体管处于放大状态时，能将 i_B 成比例地放大为 i_C 。



➤ 发射结正向偏置，多子扩散运动形成发射极电流 I_{EN} 大

➤ 载流子在基区扩散和复合：形成电流 I_{BN} 小
形成电流 I_{EP} 小

➤ 集电结反向偏置，少子的漂移运动：

非平衡少子形成电流 I_{CN} 大
平衡少子形成电流 I_{CBO} 小

三个极电流关系： $I_C + I_B = I_E$

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

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B$$

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

仿真测量2N2222A 的 I_{CEO} 约为1nA 穿透电流 $I_{CEO} = (1 + \beta) I_{CBO}$

$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

共射**直流**电流放大系数

$$\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}}$$

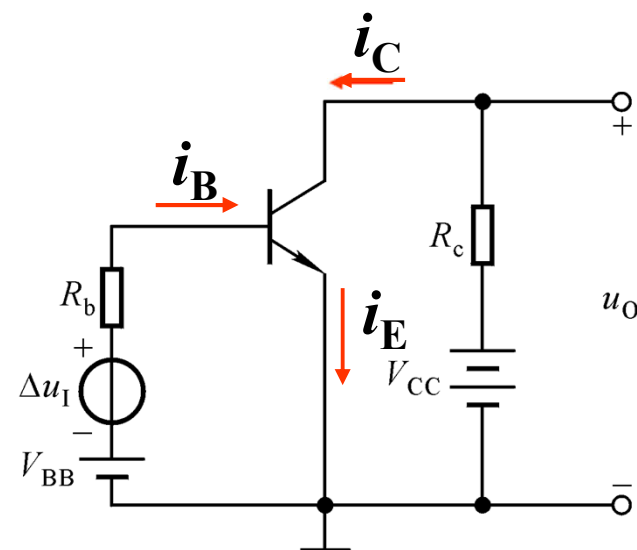
共基**直流**电流放大系数

$$\beta = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

共射**交流**电流放大系数

$$\alpha = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \right|_{U_{CB}=\text{常数}}$$

共基**交流**电流放大系数



$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

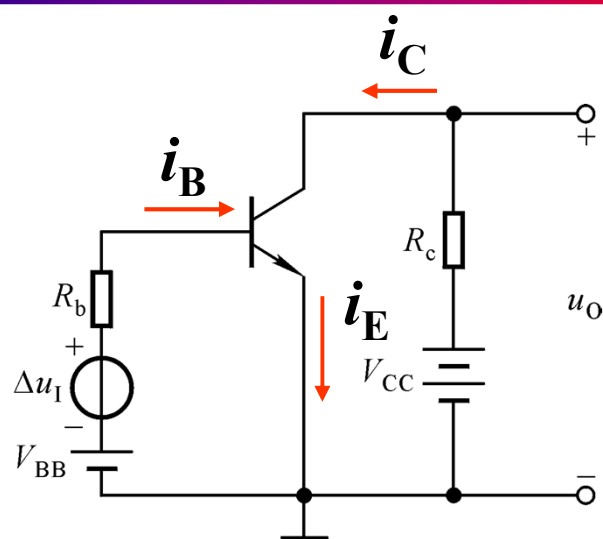
近似分析中可认为 α 、 β 恒定，且 $\beta = \bar{\beta}$ ， $\alpha = \bar{\alpha}$

$$I_C \approx \beta I_B$$

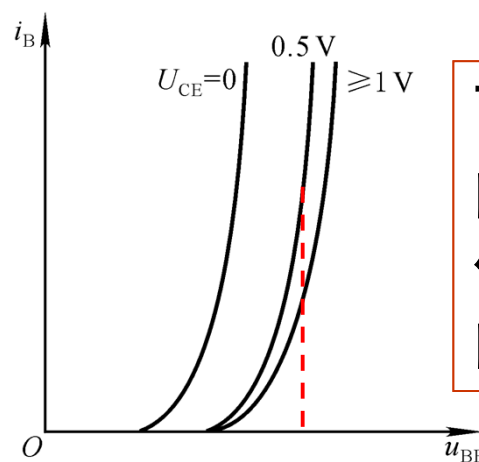
$$I_C \approx \alpha I_E \approx I_E, \quad \beta \gg 1$$

$$I_E = I_S \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

三、晶体管的共射特性曲线(Common-Emitter Characteristics)



1. 输入特性: $i_B = f(u_{BE})|_{U_{CE}=C}$



可用 $U_{CE}=1V$ 的一条曲线代替 $U_{CE}>1V$ 的所有曲线

- $U_{CE}=0$ 时
特性与二极管伏安特性相似
- 当 U_{CE} 增大时
特性曲线右移
- 当 $U_{CE}>1V$ 以后
特性曲线右移很少

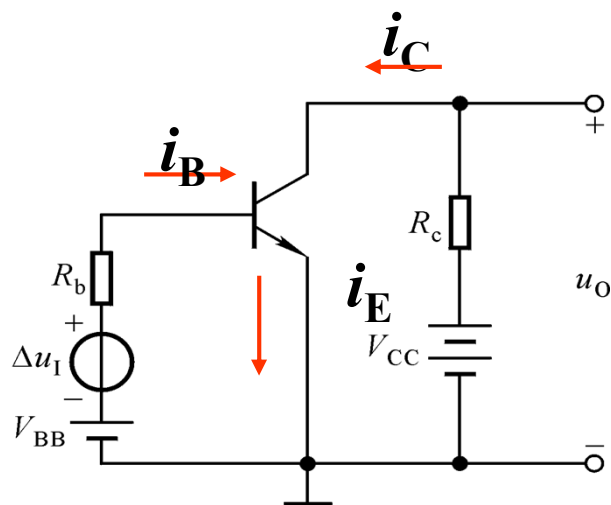
温度对输入特性的影响:
 $T \uparrow \rightarrow$ 特性曲线左移

2. 输出特性

$$i_C = f(u_{CE})|_{I_B = C}$$

• 分为三个工作区

• 理想情况下放大区曲线平行于横轴、间隔均匀

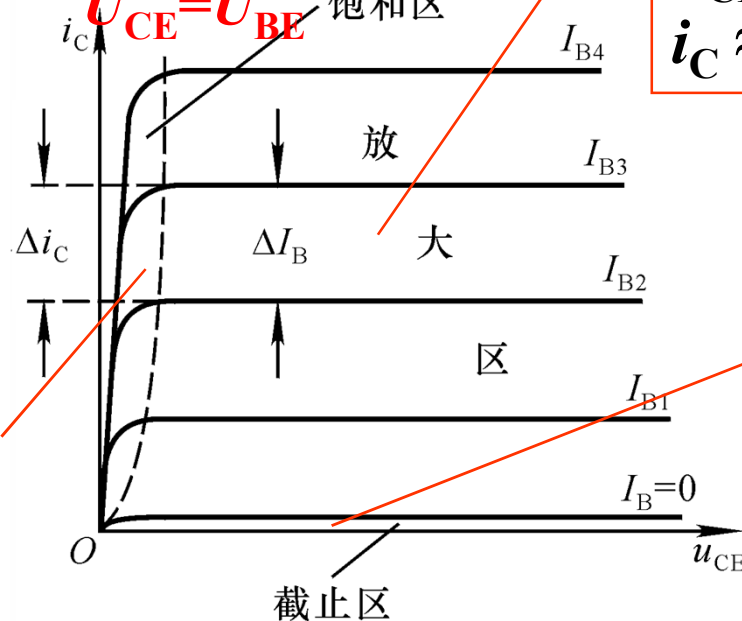


饱和区:

$$\begin{aligned} u_{BE} &> U_{on} \\ u_{BE} &> u_{CE} > 0 \\ i_C &< \beta i_B \end{aligned}$$

临界放大

$$U_{CE} = U_{BE} \text{ 饱和区}$$



放大区: (模拟电路)

$$\begin{aligned} u_{CE} &\geq u_{BE} > U_{on} \\ i_C &\approx \beta i_B, \Delta i_C \approx \beta \Delta i_B \end{aligned}$$

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

截止区:

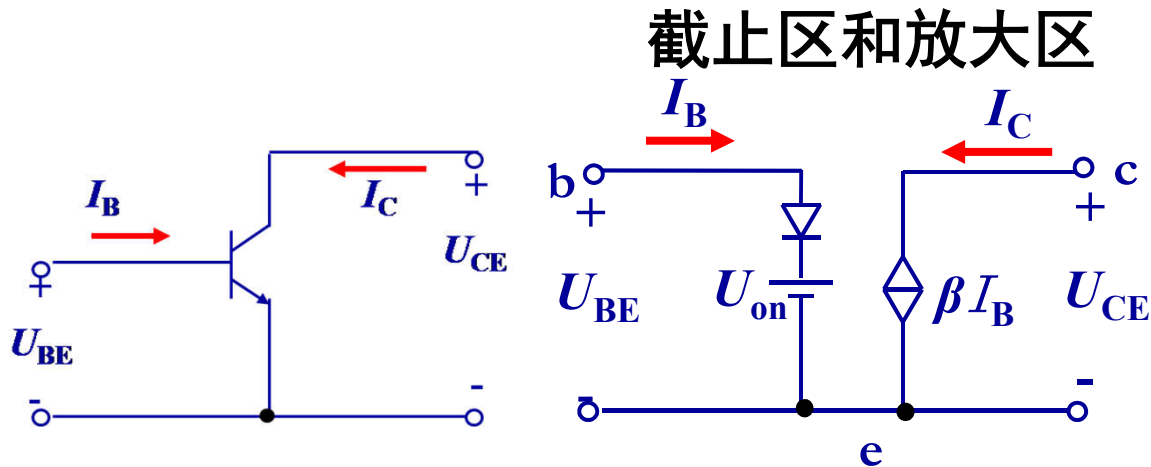
$$\begin{aligned} u_{BE} &\leq U_{on} \\ u_{CE} &> u_{BE} \\ i_C &\approx 0, i_B \approx 0 \end{aligned}$$

问题: PNP型晶体管的输出特性?
温度对输出特性有何影响?

$T \uparrow \rightarrow \beta \uparrow, I_{CEO} \uparrow, i_C \uparrow \rightarrow$ 输出特性上移, 间距加大

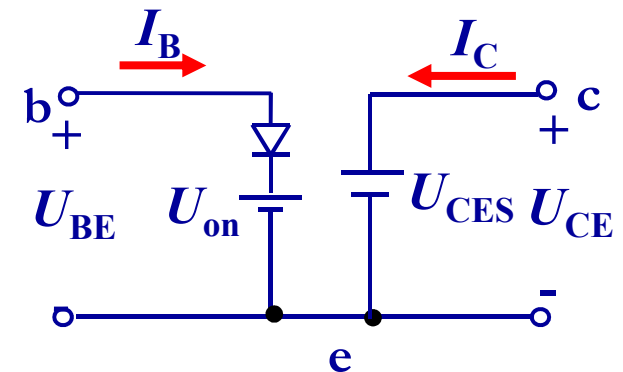
四、晶体管的直流等效电路(DC Equivalent Circuit)

➤ NPN型

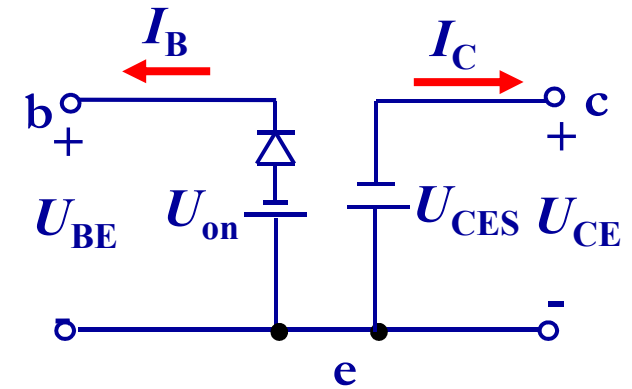
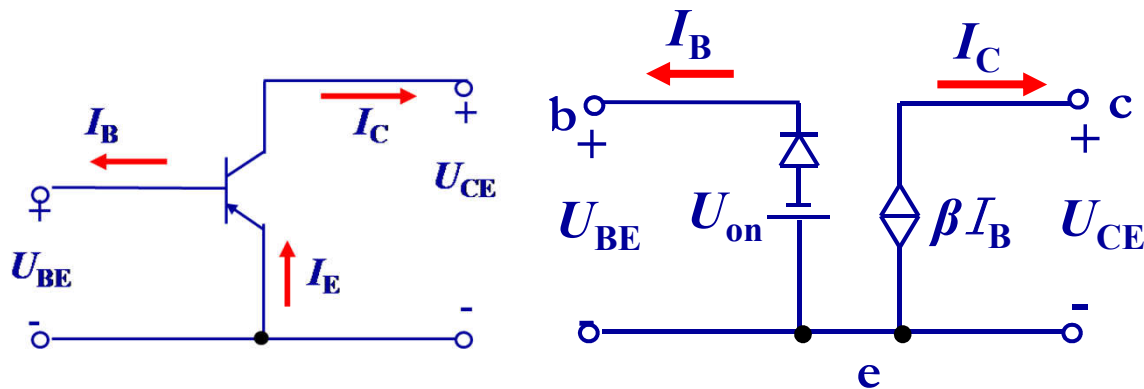


临界饱和 $U_{CE} \approx 0.7V$

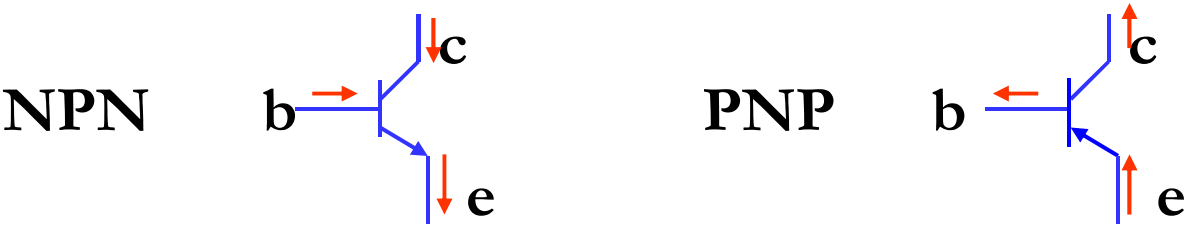
饱和区 $|U_{CES}| \approx 0.2V$



➤ PNP型



两种晶体管三个工作区对照表



NPN	u_{BE}	u_{BC}	i_C	工作区	u_{EB}	u_{CB}	i_C	PNP
	$\leq U_{on}$	< 0	0	截止区	$\leq U_{on}$	< 0	0	
	$> U_{on}$	< 0	βi_B	放大区	$> U_{on}$	< 0	βi_B	
	$> U_{on}$	> 0	$< \beta i_B$	饱和区	$> U_{on}$	> 0	$< \beta i_B$	

五、晶体管的主要参数（自学）

1. 直流参数

共射直流电流放大系数 $\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$

共基直流电流放大系数 $\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E}$ $\bar{\alpha} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}}$

极间反向电流 I_{CBO} , $I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO}$

2. 交流参数

共射交流电流放大系数 $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \bigg|_{U_{CE}=\text{常数}}$

共基交流电流放大系数 $\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \bigg|_{U_{CB}=\text{常数}}$ $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$

极间电容: C_{JE} , C_{JC}

近似分析中可认为 α 、 β 恒定, 且 $\beta = \bar{\beta}$, $\alpha = \bar{\alpha}$

3. 极限参数

最大集电极电流 I_{CM} ：使 β 明显下降的 I_C

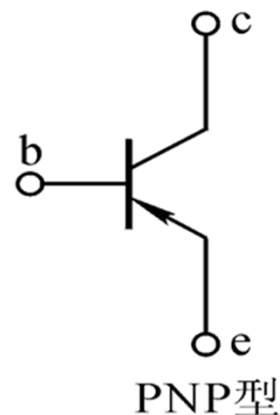
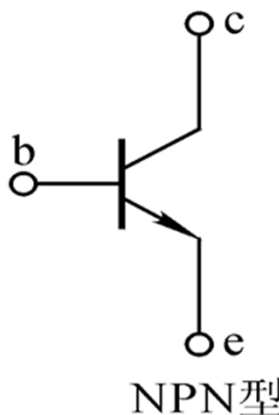
最大集电极耗散功率 P_{CM} ：管子安全工作的最大功率

$$P_{CM} = I_{CM} \cdot U_{CE}$$

极间反向击穿电压： $U_{(BR)EBO}$ （较小，只有几伏）

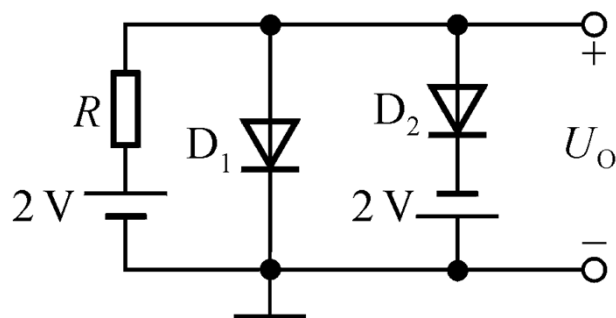
$U_{(BR)CBO}$ （为几十伏）

$U_{(BR)CEO}$ （ $< U_{(BR)CBO}$ ）

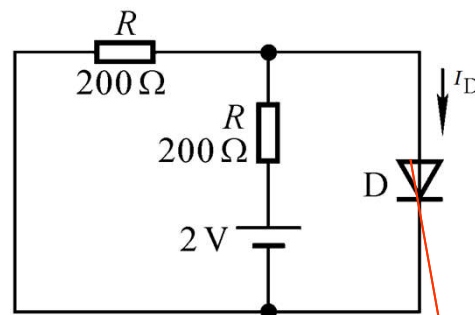
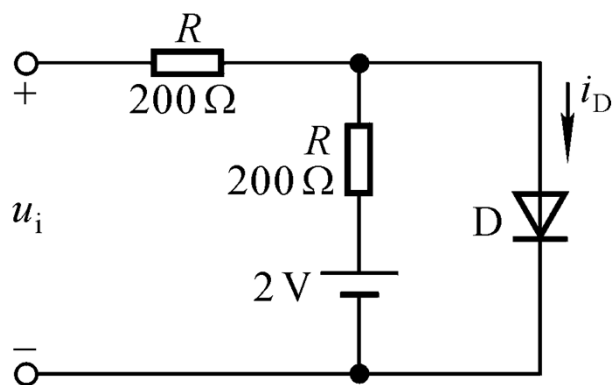


- 讨论1:**
- 如何判断二极管的工作状态?
 - 选用二极管的什么等效电路?

(1) 求 u_O



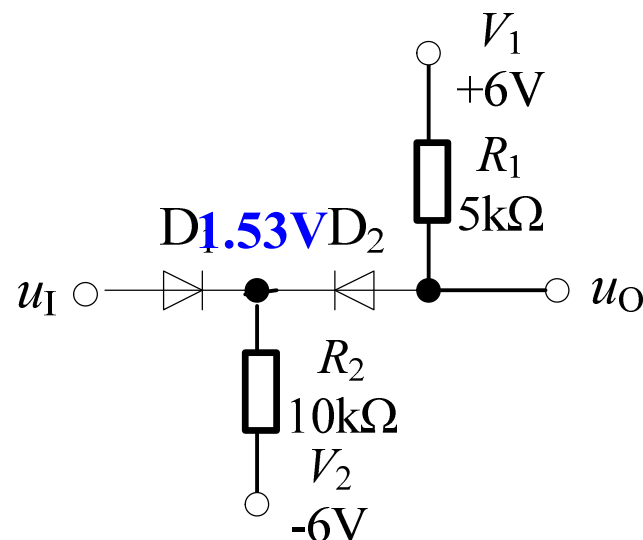
(3) 分析 i_D



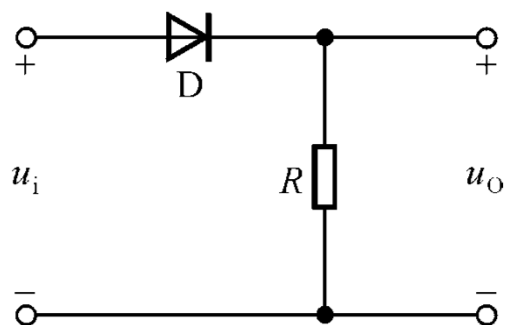
$$U_D \approx 0.7V$$

$$r_d$$

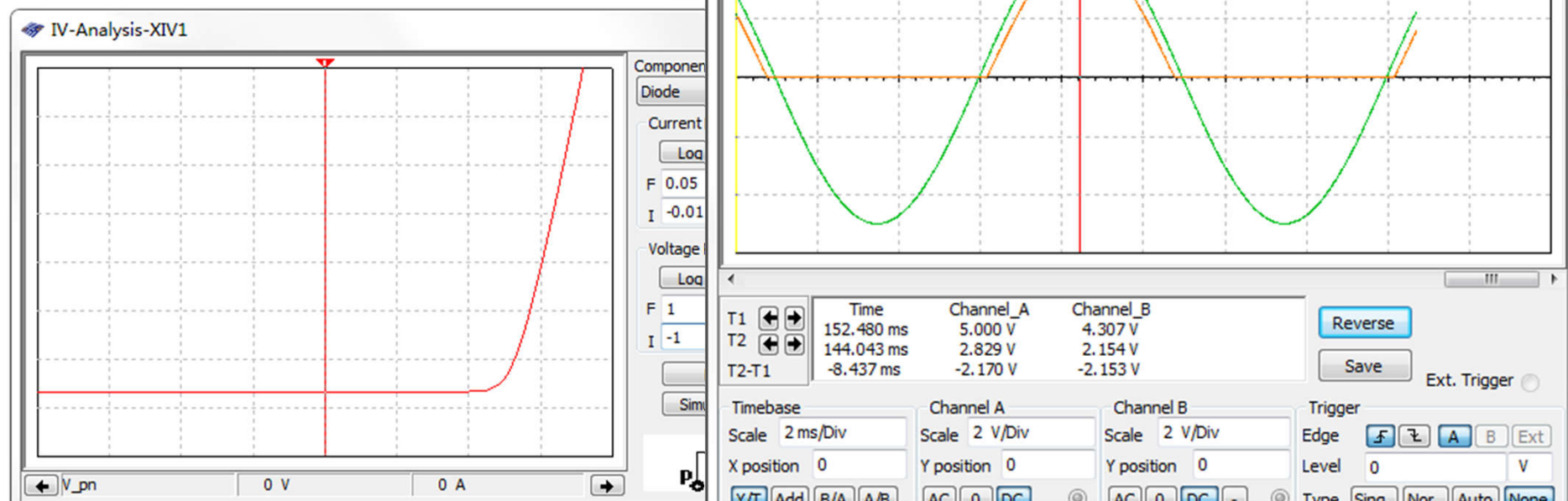
(2) 当 u_I 分别为 0V、3V、5V、10V 时求 u_O 的值。



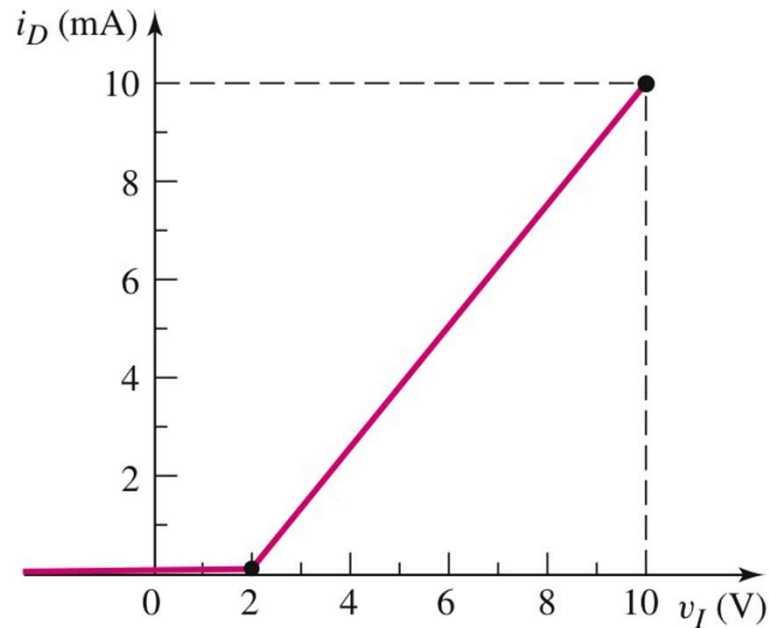
讨论2：半波整流电路 已知二极管导通电压 $U_D=0.7V$ ， $R=1k\Omega$
 $u_i = 5\sin(2\pi*100)t (V)$ 。画出 u_O 的波形。



仿真结果

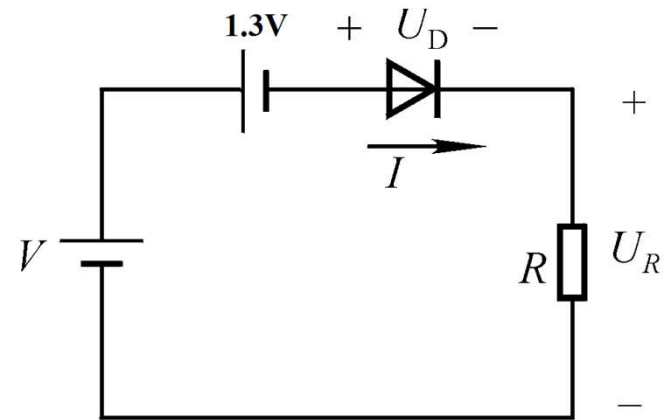


讨论3：用二极管设计一个电路，使其电流与输入电压满足如图所示的关系。已知二极管导通电压 $U_D=0.7V$ 。



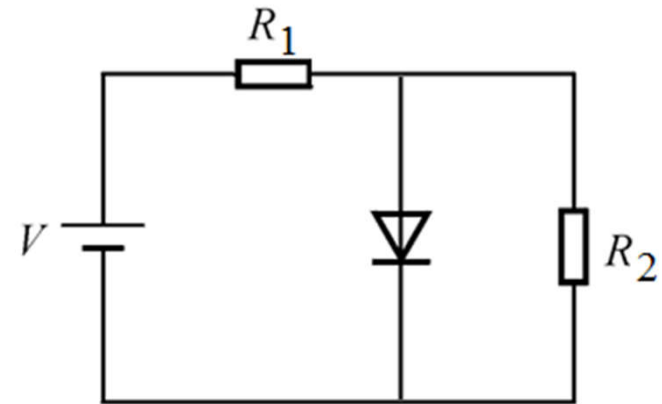
$$i_D = 0, \quad u_I \leq 2V$$

$$i_D = (u_I - 2) / 0.8k \quad u_I > 2V$$



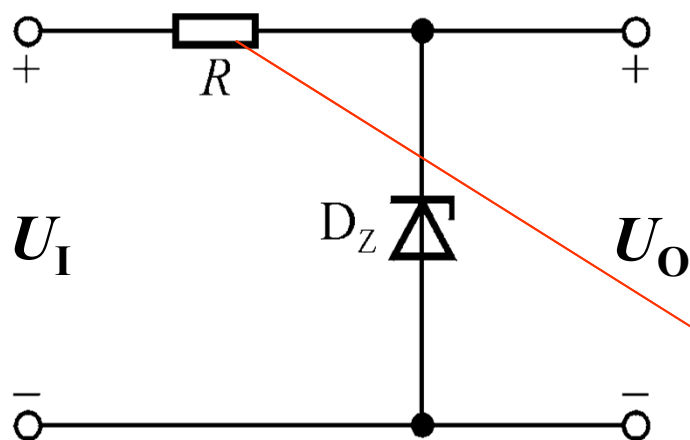
$$i_D = 0, \quad u_I \leq 2V$$

$$i_D = (u_I - 0.7) / 0.8k - 0.7 / 0.431k \quad u_I > 2V$$



讨论4： 已知稳压管的 $U_Z=6V$ ， $I_Z=5mA$ ， $I_{ZM}=30mA$ 。

1. 设电阻 R 取值合适，求 U_I 分别为5V、10V时 U_O 的值；
2. 设 $U_I=10V$ ，求使稳压管正常稳压时限流电阻 R 的范围。



1. $U_I=5V$ 时 $U_O=5V$

$U_I=10V$ 时 $U_O=6V$

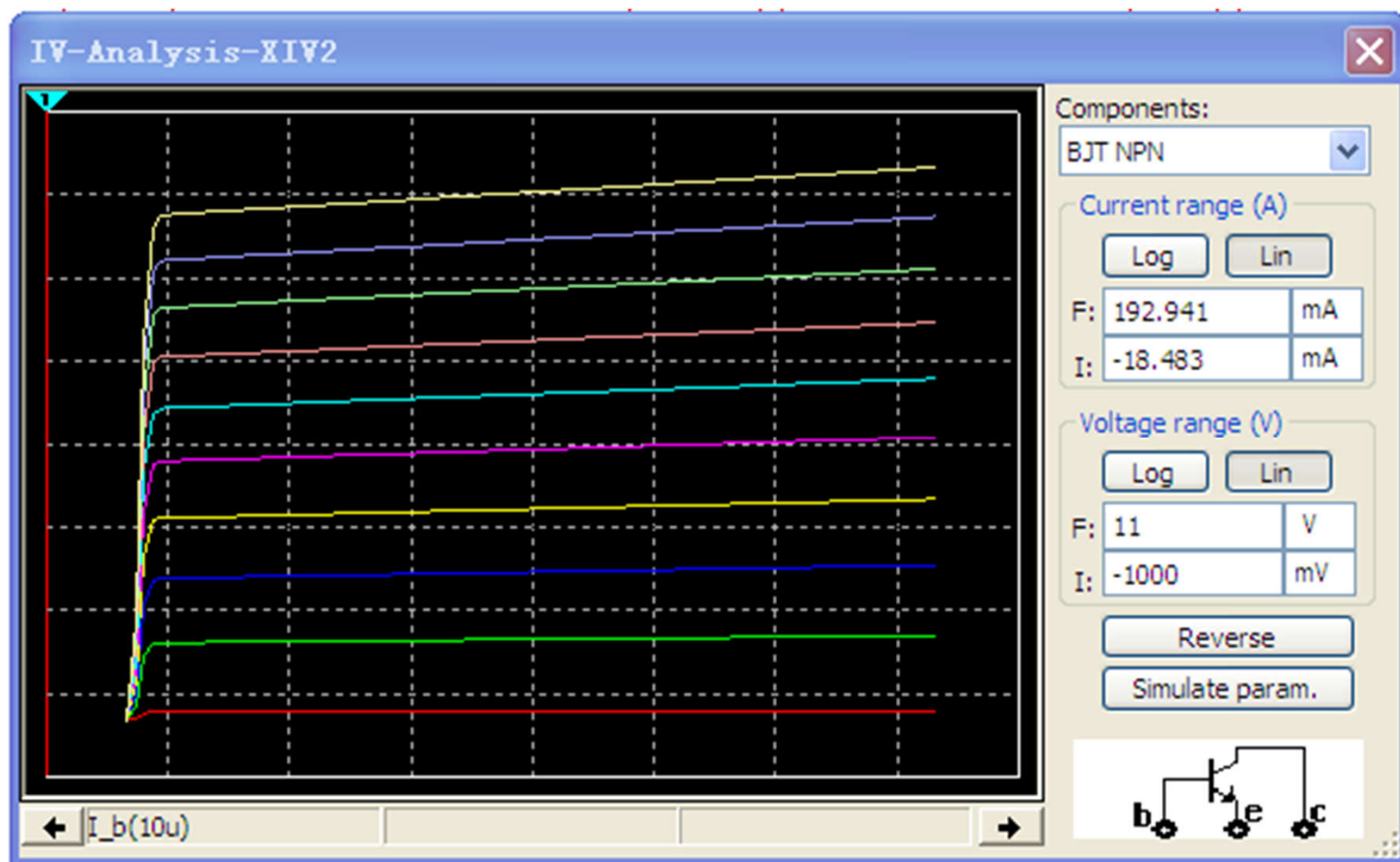
限流电阻 R 不可少

2. 限流电阻 R 必须保证稳压管的电流在 I_Z 和 I_{ZM} 之间

由 $I_Z < I_{DZ} = \frac{U_I - U_Z}{R} < I_{ZM}$ ，求出限流电阻 R 的范围

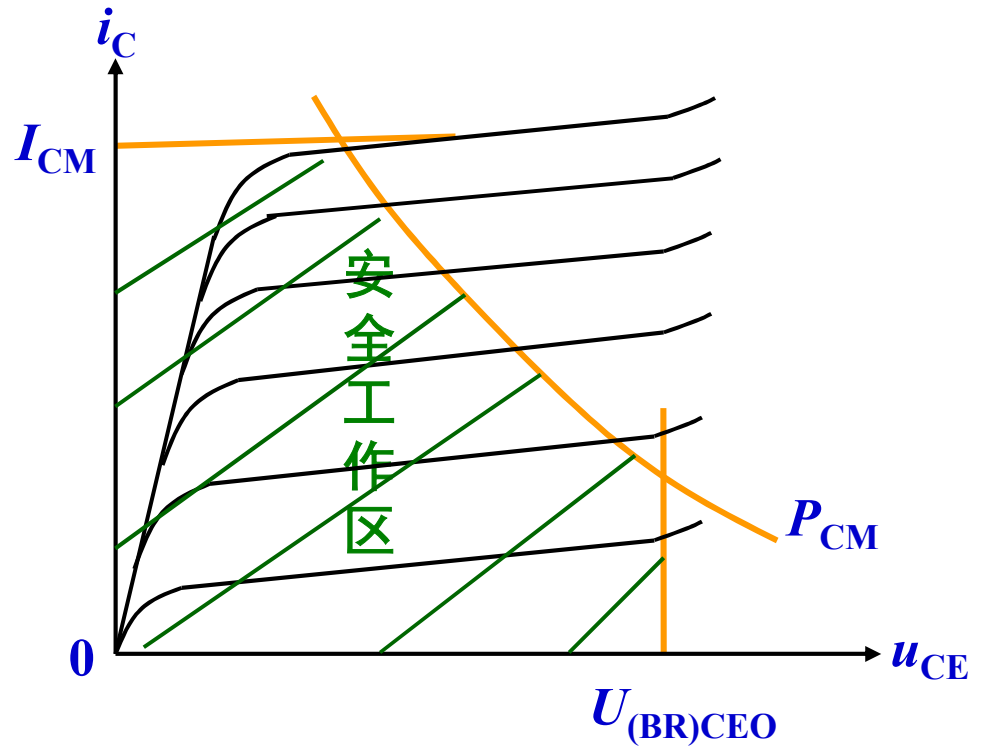
稳压管稳压的条件： 回路电压大于稳定电压且稳压管的电流在 I_Z 和 I_{ZM} 之间

讨论5：实际晶体管的输出特性

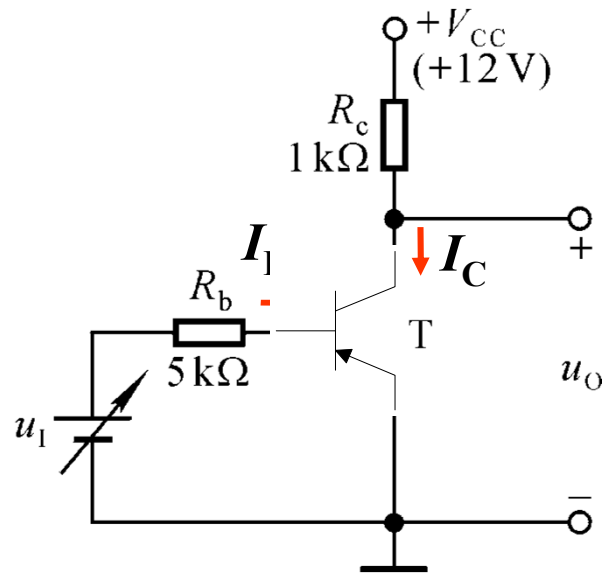


讨论5：实际晶体管的输出特性

- 上翘，与横轴有一定的夹角。
- 所有特性曲线反向延伸后与横轴相交于一点 V_A (Early Voltage)。
- 间隔不均匀 (β 只在 I_C 的一定范围内恒定)。
- 安全工作范围：
 I_{CM} , P_{CM} , $U_{(BR)CEO}$



- 讨论6:**
1. 试分析晶体管T是否可能处于放大状态;
 2. 若晶体管T改为PNP型管, 试分析使其工作在放大状态的必要条件。



1. 可能放大的必要条件:

$$u_I > U_{on}$$

2. 必要条件:

$$V_{CC} < 0, \quad u_I < 0$$

方法: 已知电源极性和电路结构:

➤ $U_{BE} < U_{on}$ (NPN), $U_{EB} < U_{on}$ (PNP) 截止状态

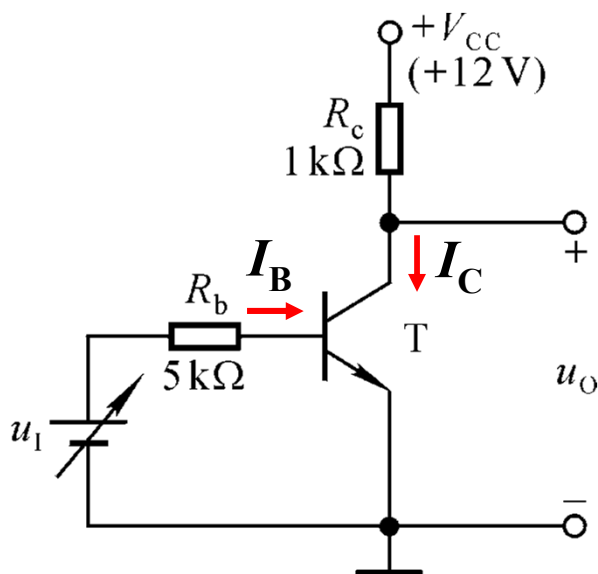
➤ $U_{BE} > U_{on}$ (NPN), $U_{EB} > U_{on}$ (PNP)

NPN: $U_C > U_B > U_E$ 放大状态

PNP: $U_E > U_B > U_C$ 放大状态

讨论7： 已知图中晶体管发射结导通时 $U_{BE} \approx 0.7V$ ， $\beta=100$ 。

试分析 $u_I = -1V$ 、 $1V$ 、 $5V$ 时 T 的工作状态。



$u_I = 1V$ 时

$$I_B = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = \frac{1 - 0.7}{5 \times 10^3} = 0.06mA$$

$$U_{CE} = V_{CC} - \beta I_B \cdot R_C \\ = 12 - 100 \times 0.06mA \times 1k\Omega = 6V$$

$U_{CE} > U_{BE}$ ，放大状态

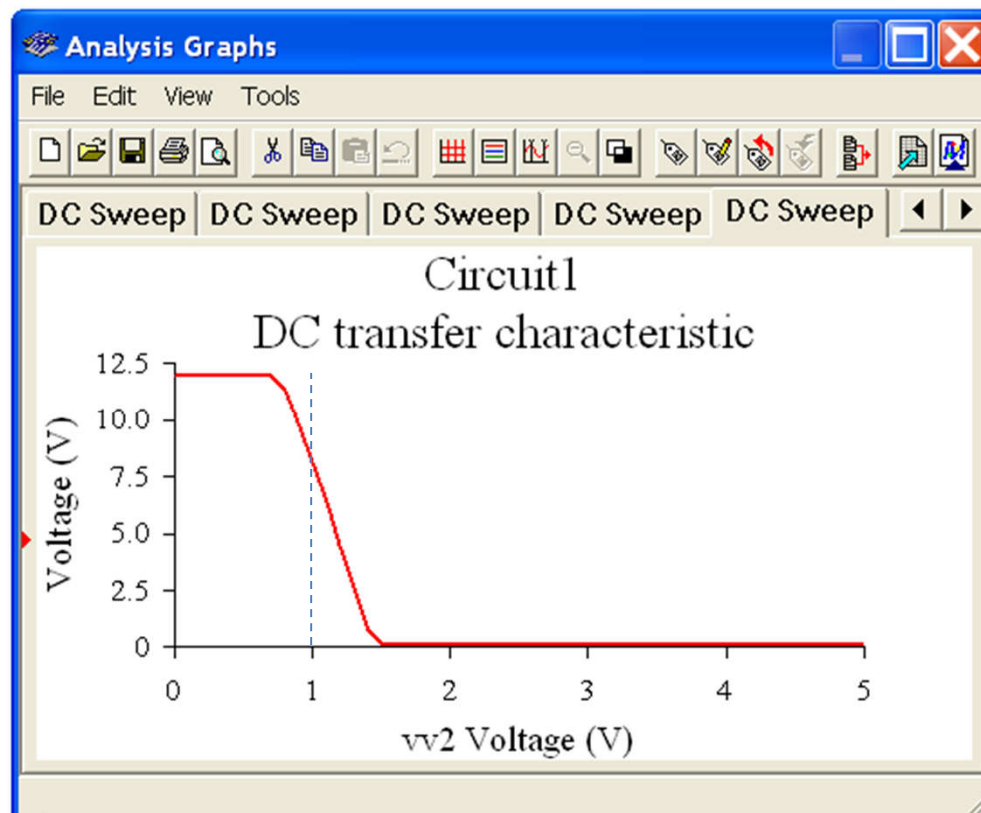
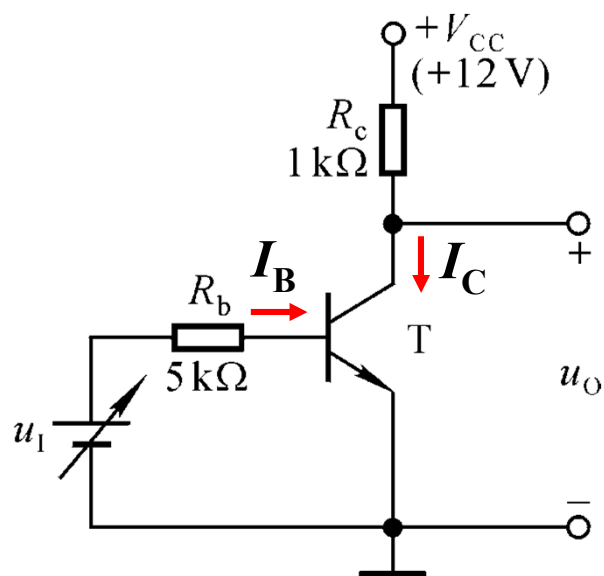
方法： 已知电路所有参数，通过临界放大条件判断：

- $U_{BE} < U_{on}$ ，截止状态
- $U_{BE} > U_{on}$ ，通过分析集电结的偏置来判断工作状态
 - a. 假设处于放大状态，即 $I_C = \beta I_B$ ；
 - b. 由输入回路计算 I_B ，得到 I_C ；由输出回路计算 U_{CE} ；
 - c. 若 $U_{CE} > U_{BE}$ ，则为放大状态，否则为饱和状态。

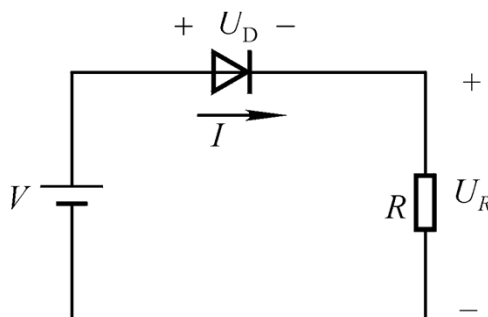
讨论8： 已知图中晶体管发射结导通时 $U_{BE} \approx 0.7V$ ， $\beta=100$ 。

试分析 $u_I = -1V$ 、 $1V$ 、 $5V$ 时 T 的工作状态。

电压传输特性仿真结果



思考题1：二极管可作为温度传感器测温。图中 V 、 R 不随温度变化，试证明正向偏置时其端电压 U_D 与温度近似成线性关系。



思考题2：已知某热敏电阻白天有光照时电阻为 $5\text{k}\Omega$ ，夜晚无光照时电阻为 $5\text{M}\Omega$ ；发光二极管导通压降约为 0.7V ，正常发光工作电流约为 2mA ；直流电源为 $+5\text{V}$ 。请选择合适的晶体管等元件设计一个电路，控制发光二极管白天灭，晚上亮。

思考题3：怎样放大一个变化的电压小信号（例如 10mV ）？

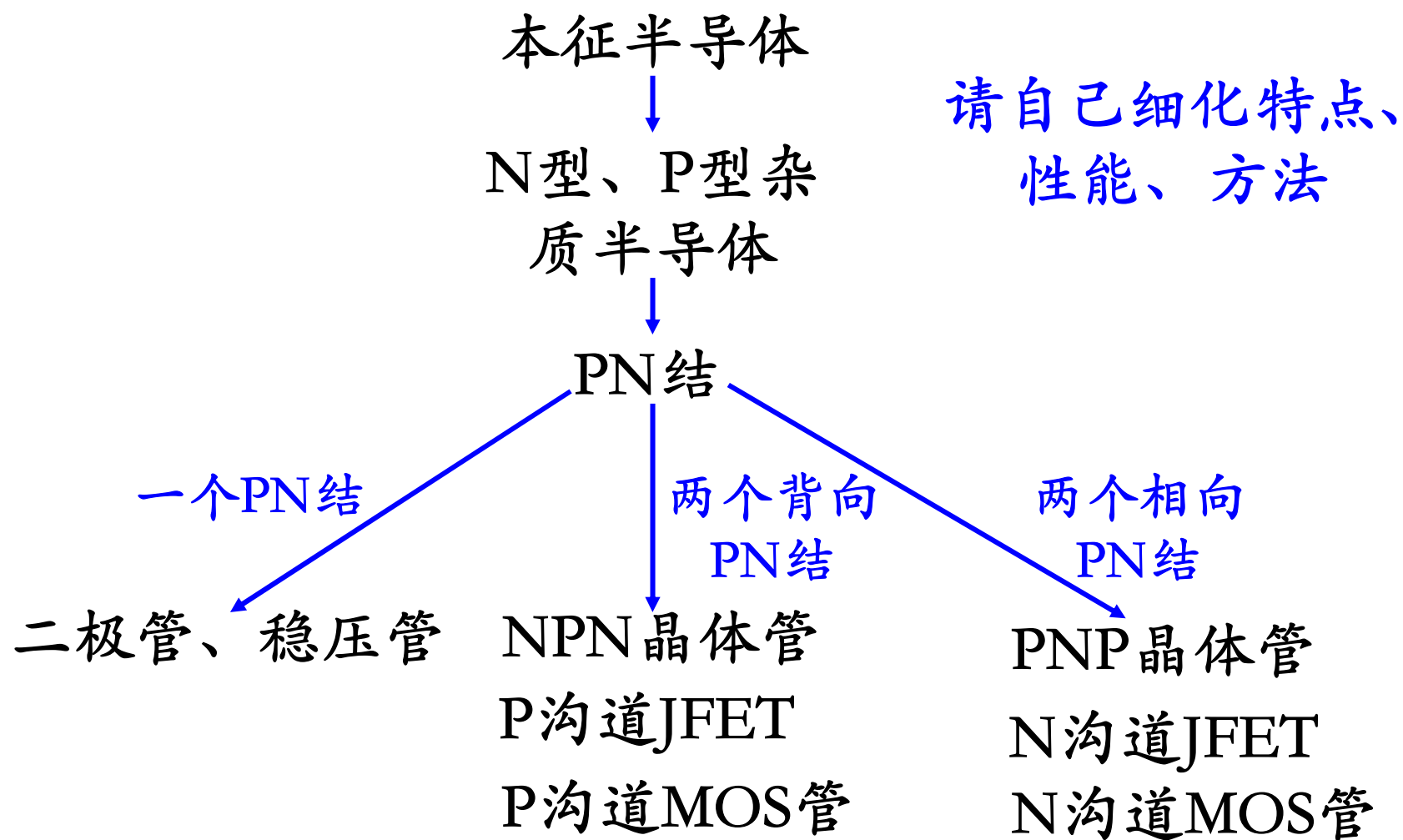
第一章内容

重点内容：1.2.2、1.2.4一、1.2.5、1.3.3、1.4.1、1.4.2

第一章要求

1. 理解下列定义、概念及原理：自由电子与空穴、本征激发与复合、扩散与漂移、空间电荷区、PN结、耗尽层；
2. 熟悉二极管的单向导电性、稳压管的稳压作用、晶体管的放大作用；
3. 掌握二极管、稳压管、晶体管的外特性、分析方法以及主要参数的物理意义。

半导体及器件结构图



第一章常见题型

- (1) 半导体基础知识正确性的判断。
- (2) 电子电路中二极管、稳压管、晶体管和场效应管工作状态的判断。
- (3) 已知电子电路的输入电压求解输出电压。
- (4) 根据管子的特性求解其主要参数。