



第五章 基本半导体器件

北京邮电大学电子工程学院

第五章 基本半导体器件

本章主要内容：

- 半导体及PN结
- 晶体二极管的结构及电路模型
- 双极型晶体三极管及其性质
- 场效应晶体管及其性质

本章重点：

- PN结的单向导电性，晶体二极管的伏安特性和基本电路模型，双极性晶体三极管的特性曲线和低频小信号电路模型。

电子电路部分的注意事项

- 注意对于约等于的使用
 - $1+100 \approx 100$
 - 交流通路中电容相当于导线
- 注意等效的使用和条件
 - 等效只有在某些情况下可以可以用
- 注意工程实践中的固定用法
 - 比如单只三极管只有三种常见的连接方式
- 注意工程实践中的常用参数
 - $U_T = 26\text{mV}$
 - 反向饱和电流

第五章 基本半导体器件

§5-1 半导体基本理论简述

§5-2 晶体二极管

§5-3 双极型晶体三极管

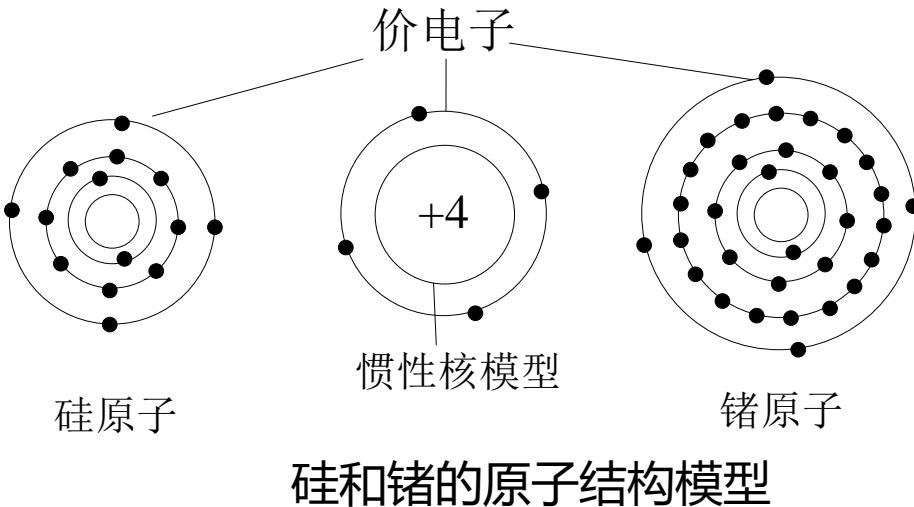
5-1 半导体基本理论简述

主要内容

1. 半导体基本概念
2. PN结与单向导电性

1. 半导体基本概念

- 根据导电特性，物质分为：导体、绝缘体、半导体
导体：存在着大量自由电子，在外电场作用下容易形成电流
绝缘体：其原子或分子的最外层电子为稳定结构，不易产生自由电子
半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。自然状态下具有绝缘体特性，而当满足一定外界条件时具有导电能力的材料。
- 元素周期表中最外层为四个电子的元素所组成的物质，都可以成为半导体。如：硅（Si）、锗（Ge），原子结构如图：

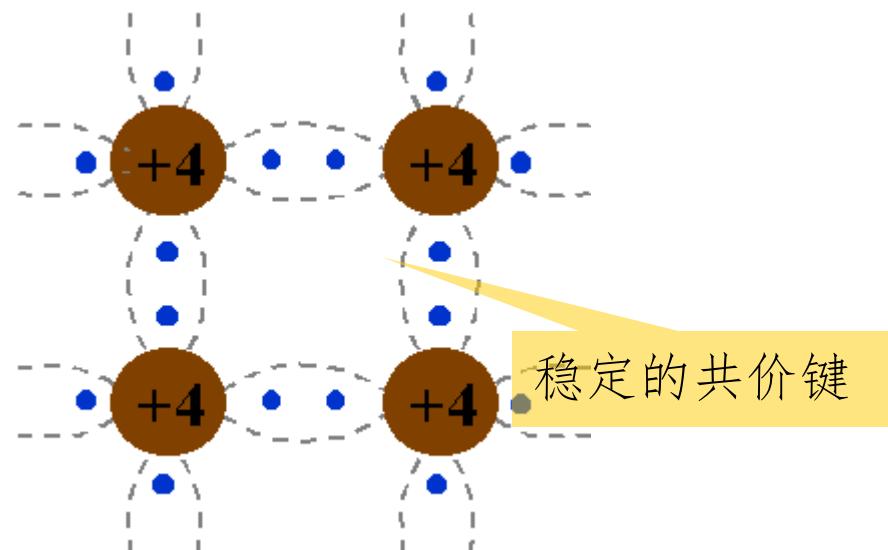


5	B	6	7	N	8	09	F	10	Ne	
硼	碳	氮	氧	氟	氯	氩				
13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18 Ar
铝	硅	磷	硫	氯	溴	氩				
31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36 Kr
镓	锗	砷	硒	溴	氪					
49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54 Xe
铟	锡	锑	碲	碘	氙					
81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86 Rn
铊	铅	铋	钋	钋	砹	氡				

十四族元素

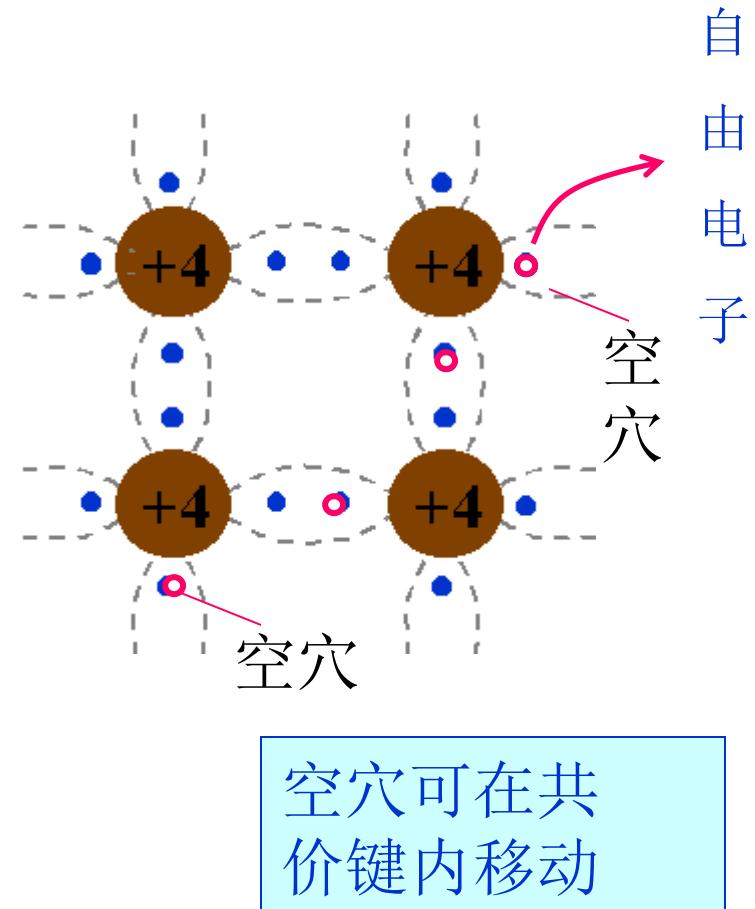
1. 半导体基本概念

- 本征半导体 (Intrinsic crystal) : 纯净、结构完整、热力学温度 $T=0\text{ K}$ 时没有自由电子的半导体。
- 晶格: 晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵, 称为晶格。以共用电子的形式, 形成共价键结构(covalent bond)。



1. 半导体基本概念

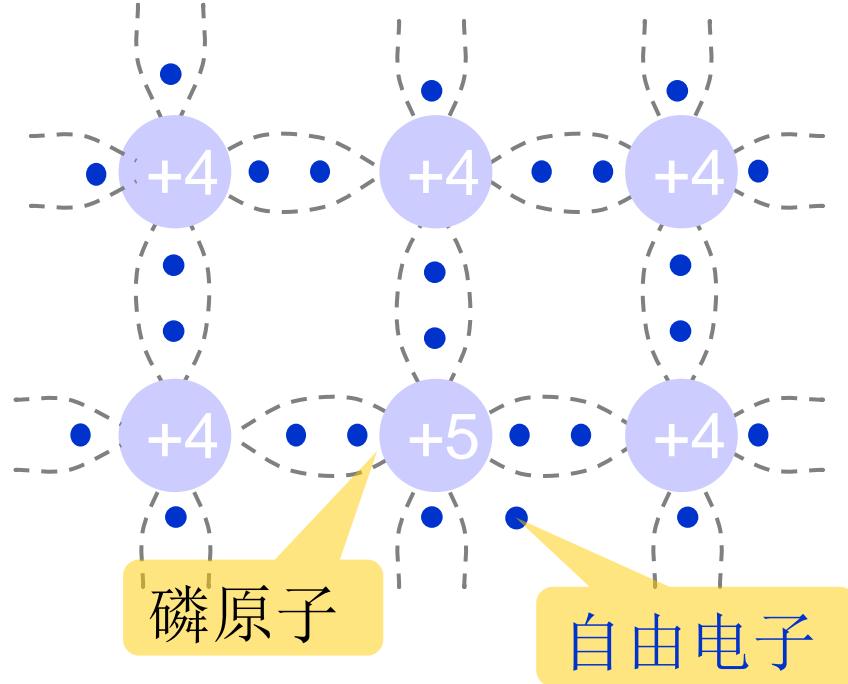
- **本征激发**: 在常温下受热引起电子激发的现象。
- **载流子**: 本征激发产生自由电子, 共价结构中留下了一个空位, 称为**空穴**; 空穴的出现, 其他共价键上的电子很容易迁移过来, 其他地方的电子有可能来填补后一个空穴; 在外电场作用下形成电子流和**空穴电流**。自由电子和空穴都参与导电, 二者统称为载流子。
- 自由电子和空穴所带的电荷极性不同, 所以它们的运动方向相反, **本征半导体中的电流等于两个电流之和**。



1. 半导体基本概念

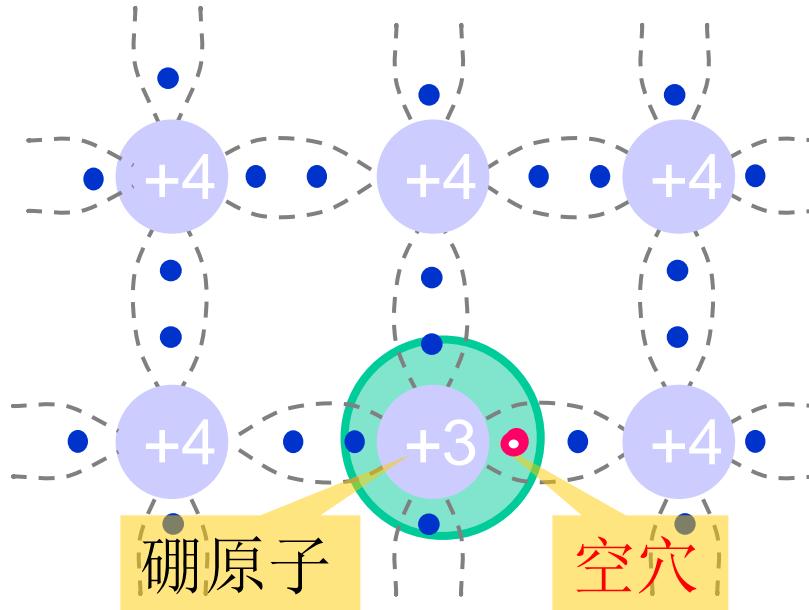
- 在本征半导体中掺杂某些微量的杂质（不破坏原有的晶格结构，会使半导体的导电性能发生显著变化——增加载流子的数量，提高导电率。
 - **N型半导体**: 在本征半导体中掺入五价元素（如磷、锑）后会出现多余电子，从而形成以自由电子为主的载流子，空穴为少数载流子，这种半导体叫做N型半导体。
 - **P型半导体**: 在本征半导体中掺入三价元素（如硼、铟等），形成多余空穴，从而形成以空穴为主的载流子，电子为少数载流子，这种半导体叫做P型半导体。

N型半导体



电子为多数载流子（多子）
空穴为少数载流子（少子）

P型半导体

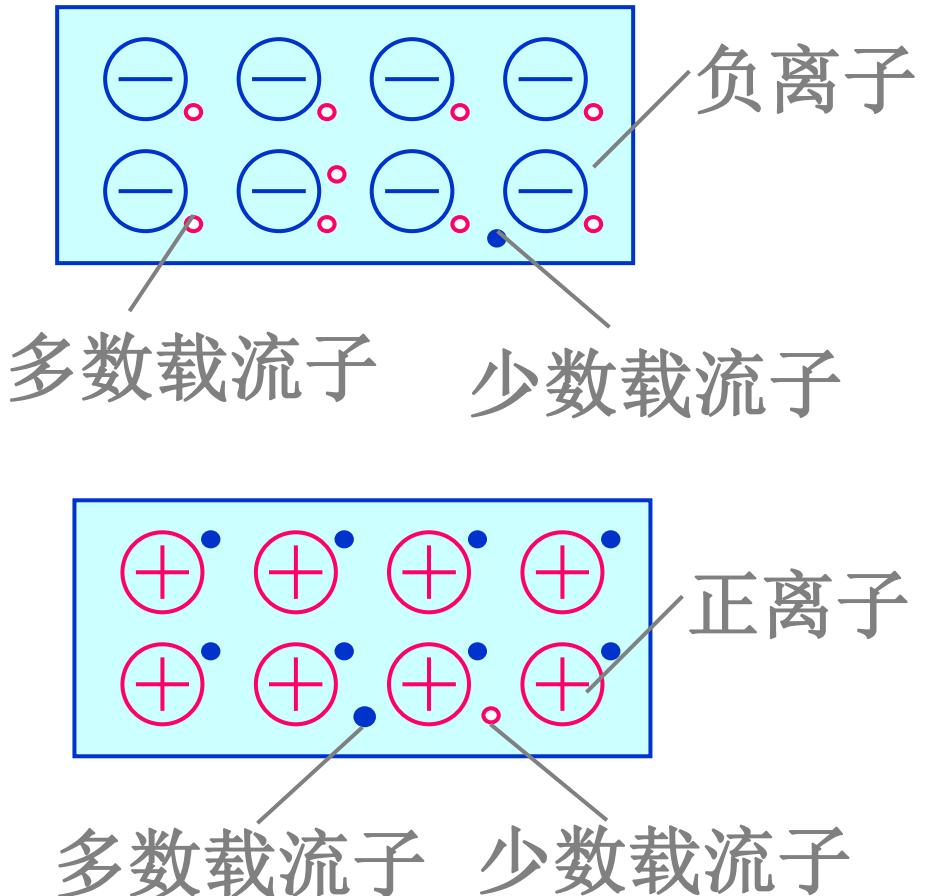


空穴 — 多子
电子 — 少子

2.PN结与单向导电性

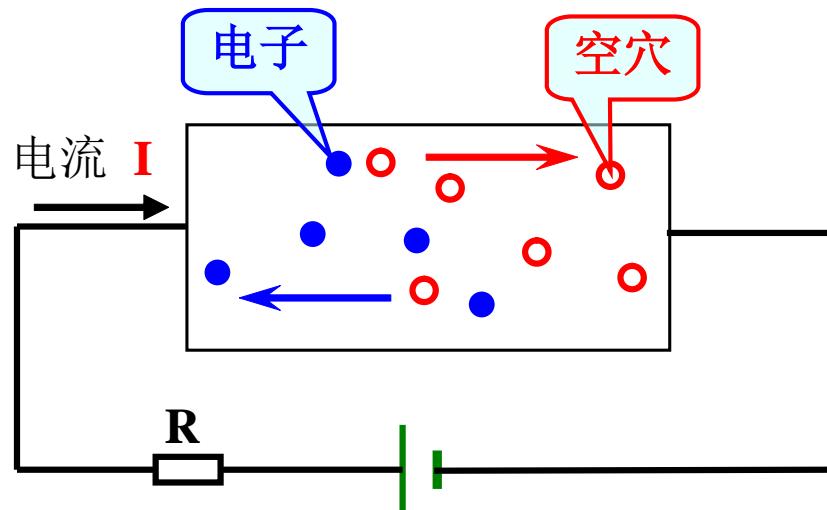
P型、N型半导体的简化图示

- 载流子数 \approx 多数载流子数（多子），起导电作用的主要是多子。
- 多子浓度主要取决于掺杂浓度。
- 少子浓度主要取决于温度。

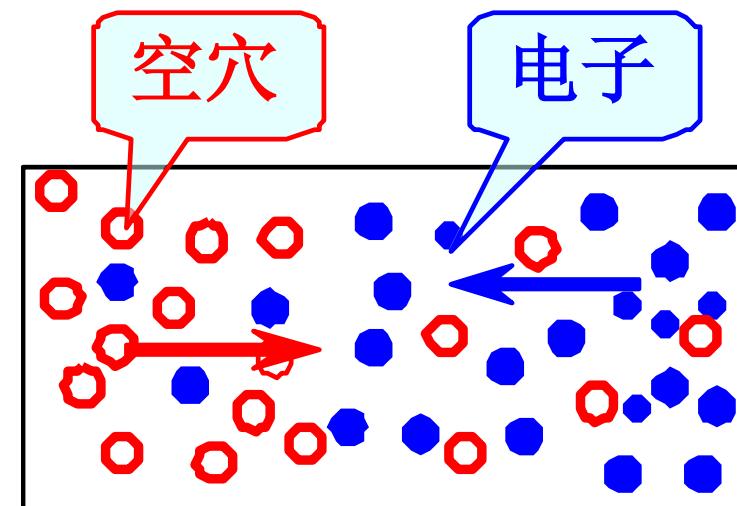


掺杂半导体的导电作用

当无外加电场作用时，半导体中的载流子做不规则热运动，对外不呈现电特性。



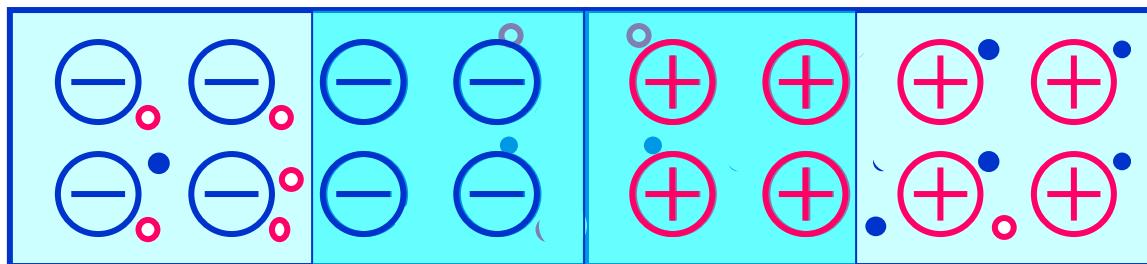
(A) 电场作用下的**漂移**



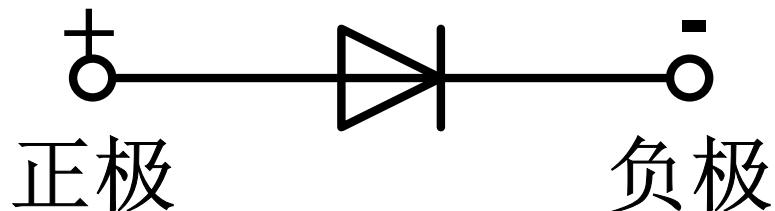
(B) 浓度作用下的**扩散**

2.PN结与单向导电性

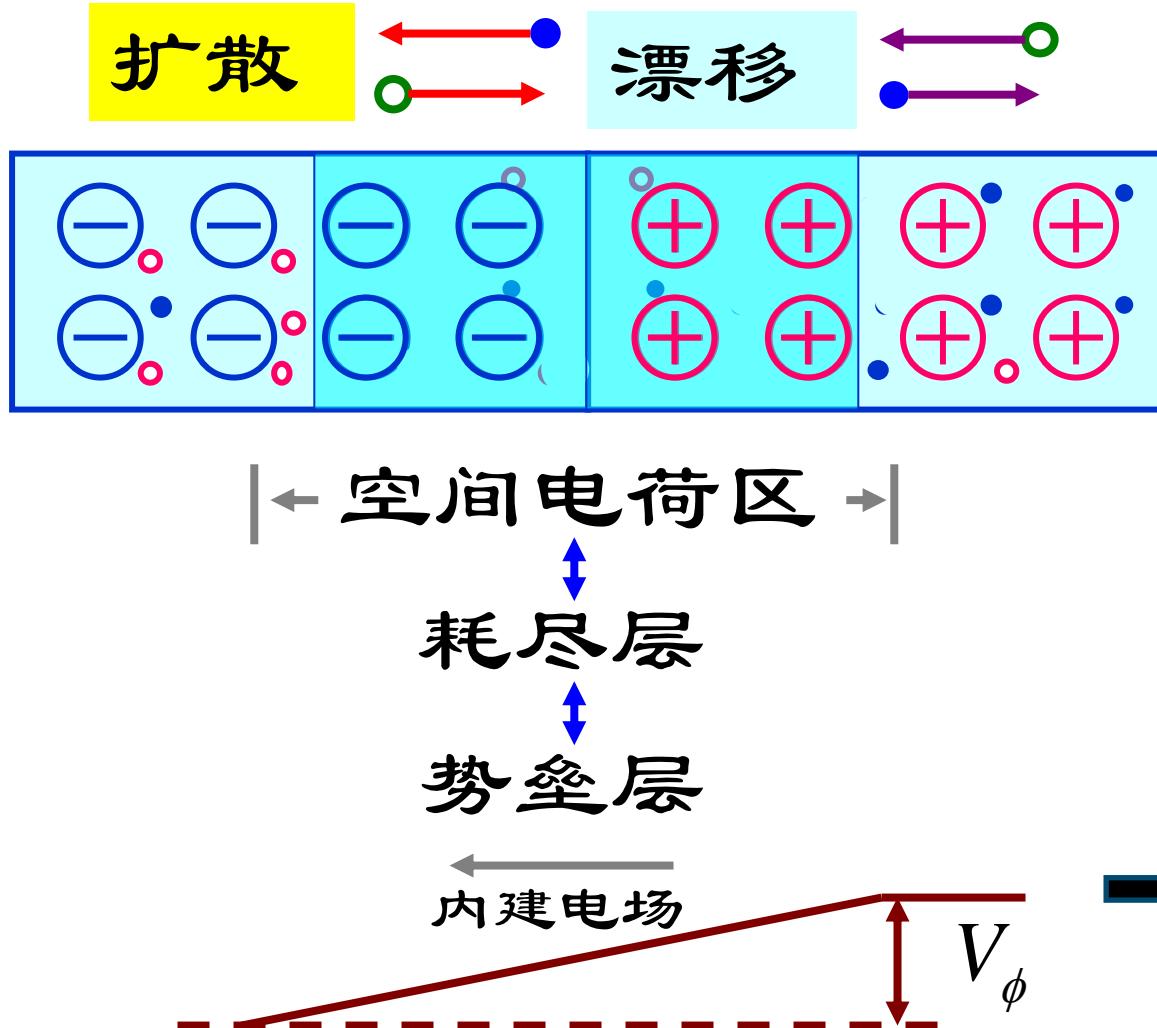
- 在同一块本征半导体基片上，将P型和N型半导体通过一定的工艺结合在一起时，交界面形成PN结，PN结是半导体器件的最基本单元结构。



- 在PN结的外面装上管壳，再引出两个电极，就构成二极管



2.PN结与单向导电性



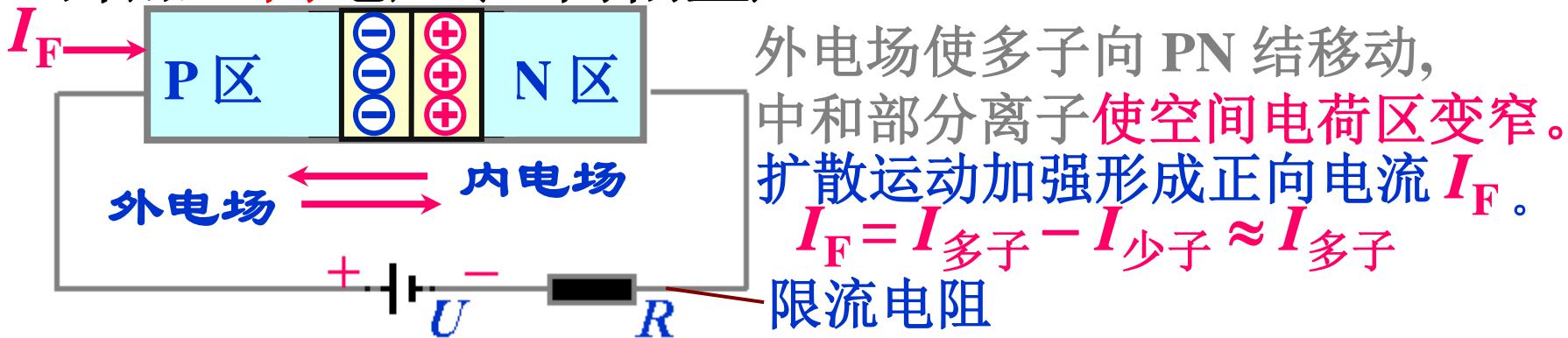
多子扩散→
形成空间电荷区→
产生内建电场→
阻止多子扩散 (势垒层)，
但促进少子漂移→
扩散和漂移达到动态平衡→
空间电荷区的宽度稳定→
(耗尽层)

$$V_\phi = \begin{cases} 0.6 \sim 0.8V, & \text{硅材料} \\ 0.2 \sim 0.3V, & \text{锗材料} \end{cases}$$

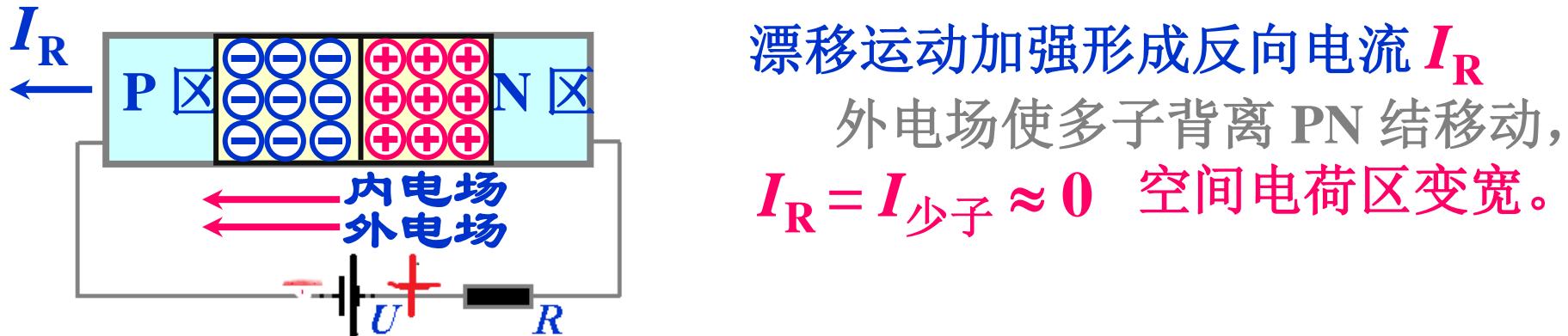
动态平衡时的空间电荷量、电荷区宽度、内建电场等参量均为常数，且与半导体材料、掺杂浓度、温度有关。

2.PN 结的单向导电性

1. 外加正向电压(正向偏置) — forward bias



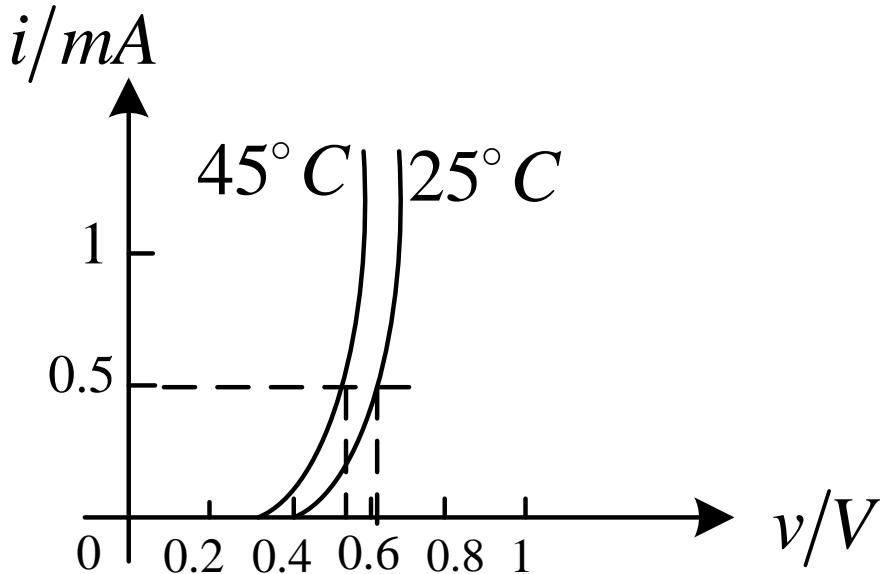
2. 外加反向电压(反向偏置) — reverse bias



PN 结的单向导电性: 正偏导通, 呈小电阻, 电流较大;
反偏截止, 电阻很大, 电流近似为零。

例题5-1

如图所示的PN结正向输出特性，试估算出温度分别为 25°C 、 45°C ，要使PN结电流达到 0.5mA ，需要的正向偏置电压的大小为多少？



PN结正向输出特性

解：

- ① 所给的特性图估计出 25°C ，正向偏置电压为 0.6V
- ② 从所给的特性图估计出 45°C ，正向偏置电压为 0.55V

结论：

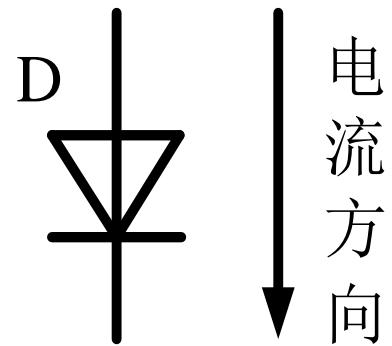
1. 半导体的电子空穴成对出现，且数量少；
2. 半导体中有电子和空穴两种载流子参与导电；
3. 半导体导电能力弱，并与温度有关。
4. 掺杂和高温都能使半导体导电能力提高。
5. PN结正向导通和反向截止特性

主要内容

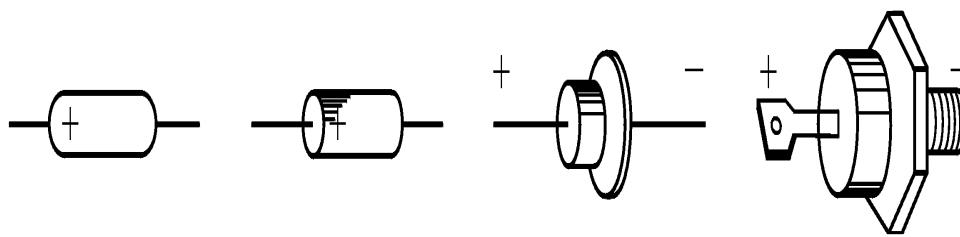
- 1.二极管的基本结构
- 2.二极管的伏安特性
- 3.二极管的主要参数
- 4.二极管基本电路模型
- 5.二极管分类

1.二极管的基本结构

- 二极管的基本结构就是一个PN结，二极管的所有特性都取决于PN结的特性，其电路符号和外形如下图所示。



(a)
二极管的电路符号



(b)
二极管的外形

1.二极管的基本结构

- 二极管根据结构，分为
 - 点接触型（图a）：结面积小，工作电流低，高频特性好
 - 面接触型（图b, c）：PN结接触面积大，工作电流大，适用于低频大电流工作

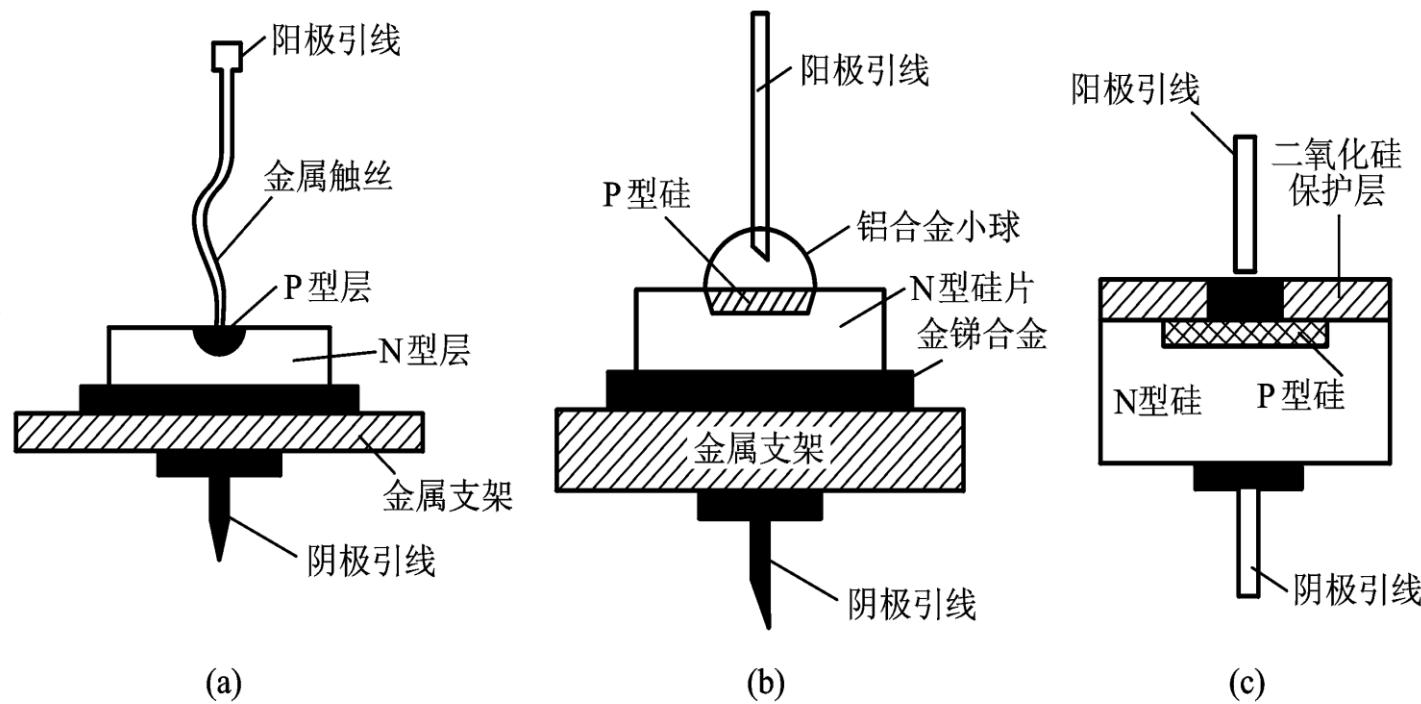


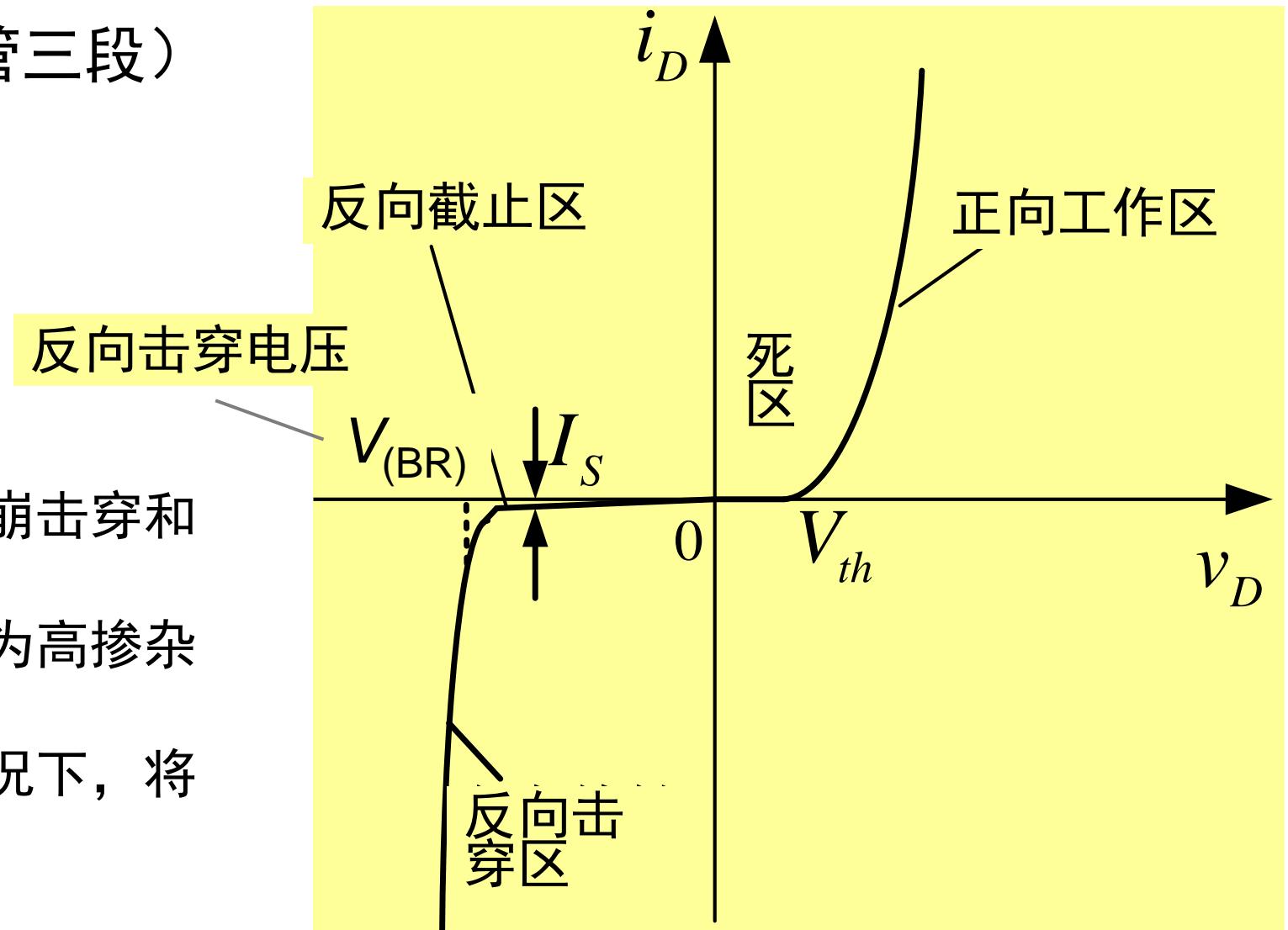
图5-2-2 二极管结构示意图

2. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性（只管三段）

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$$

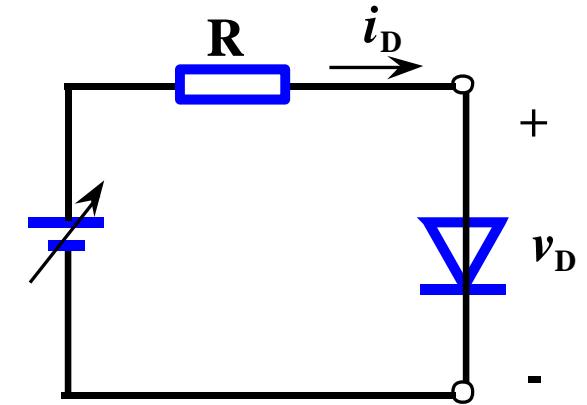
- (电) 击穿的两种形式：雪崩击穿和齐纳击穿
- 齐纳击穿一般小于6V，材料为高掺杂，耗尽层宽度小
- 电击穿可逆，电流过大等情况下，将导致热击穿，热击穿不可逆



2.二极管的伏安特性

二极管的伏安特性 $i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$

v_D : 二极管电压 I_S : 反向饱和电流

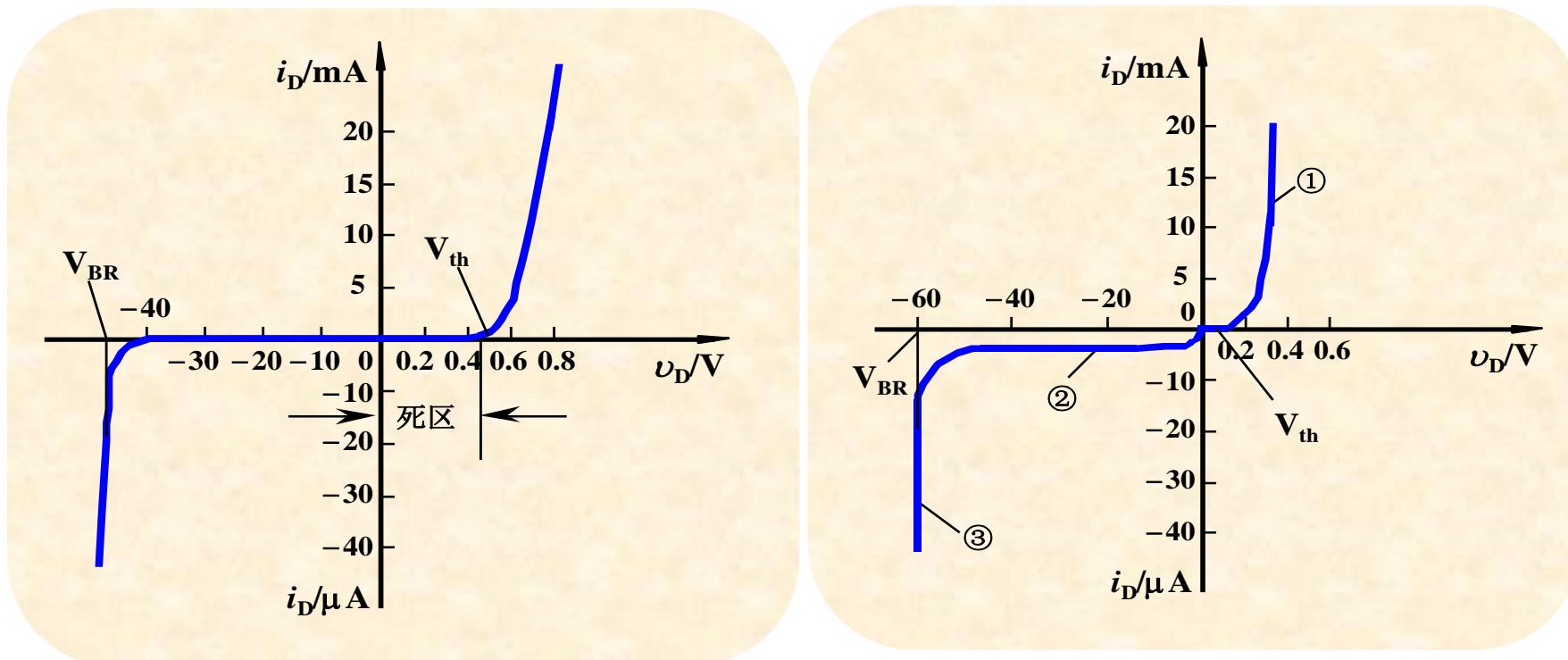


$V_T = \frac{kT}{q}$ 温度电压当量。室温条件下 ($T=300K$)，约为 **26mV**

若为正偏且 $v_D \gg V_T$, 则有 $i_D = I_S e^{v_D/V_T}$

若为反偏且 $v_D \ll V_T$, 则有 $i_D \approx -I_S$

2. 二极管的伏安特性

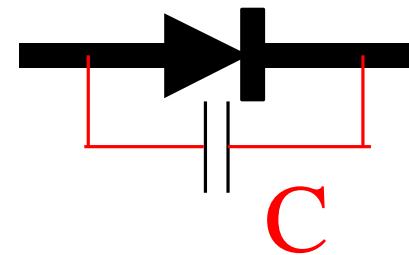


硅管比锗管的反向电流小，故温度稳定性比锗管好。

材料	开启电压 V_{th}	导通电压 V	反向饱和电流 I_s
硅(Si)	$\approx 0.5\text{V}$	$0.6\sim 0.8\text{V}$	$< 0.1\mu\text{A}$
锗(Ge)	$\approx 0.1\text{V}$	$0.1\sim 0.3\text{V}$	几十 μA

3.二极管的主要参数

- 最大整流电流 I_{OM} : 二极管长期工作时，允许通过的最大正向平均电流。
- 最大反向偏置电压 U_{RM} : 保证二极管不被击穿而允许的最高反向电压，约为击穿电压的一半。点接触二极管约为数十伏，面接触二极管可达数百伏。手册上给出的最高反向工作电压 V_R 一般是击穿电压 V_{BR} 的一半。
- 最大反向电流 f_M : 二极管加上最大反向偏置电压时的反向电流。反向电流越大，说明二极管的单向导电性越差，且受温度影响也越大。
- 最高工作频率 I_{RM} : 二极管具有单向导电性的最高工作频率。由于PN结有电容效应，频率过高，单向性变差。点接触二极管PN结面积小，结电容小，适合工作在高频；面接触二极管适合工作在低频、大电流环境中。



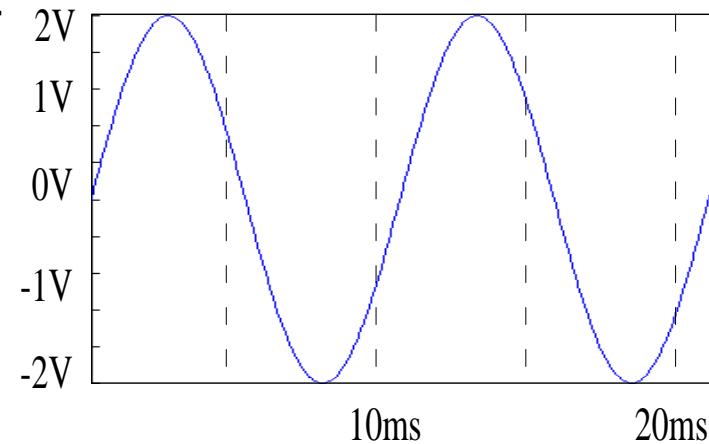
等效电容

例5-2

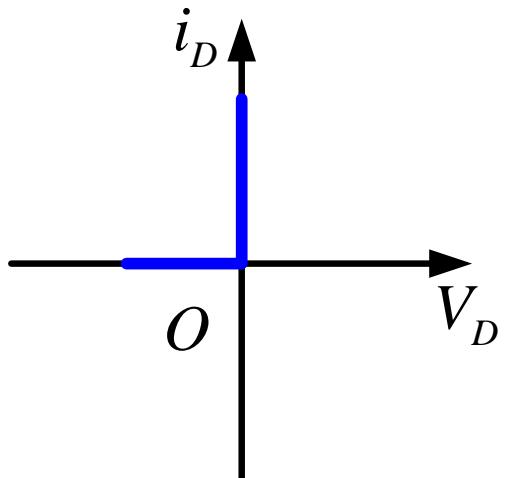
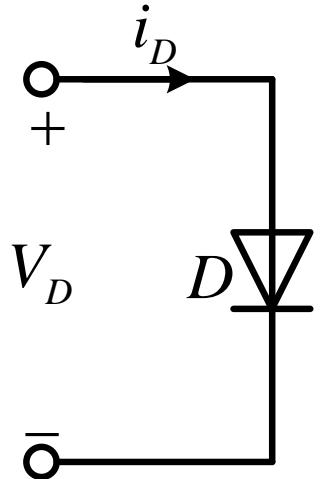
某电路的交流信号为正弦波，峰峰值为4V，偏置电压为0V，频率为100Hz。电路的电源电源（二极管可能遇到的最大反向电压）为16V，电路要求经过二极管的信号幅度损失不大于0.7V。试画出此正弦波的波形图，并确定选择二极管时主要参数的选择范围。

解：根据题意要求，选择二极管时应当参考以下参数：

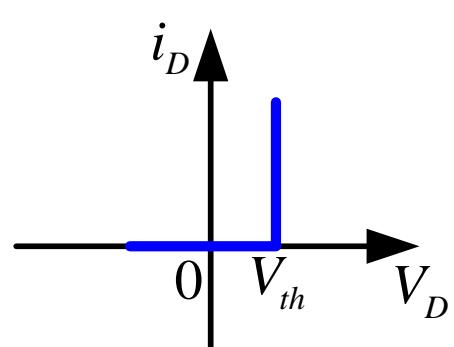
- ① 最大反向击穿电压大于16V
- ② 工作频率高于100Hz
- ③ PN结压降小于0.7V
- ④ 正弦波形右图所示。



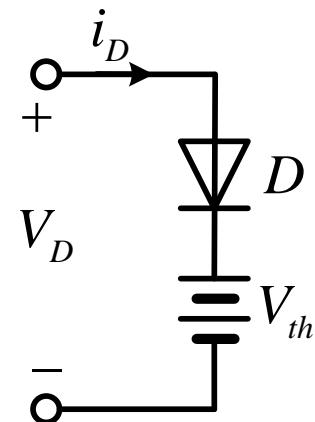
4.二极管基本电路模型



二极管理想化
模型：正向导
通电压为零

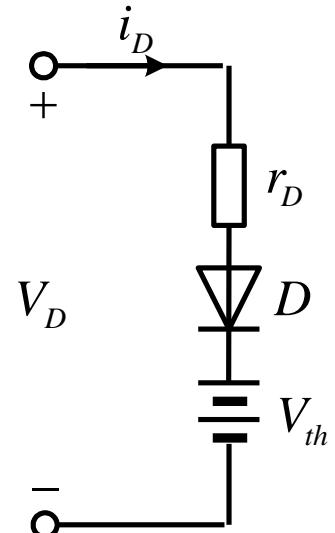
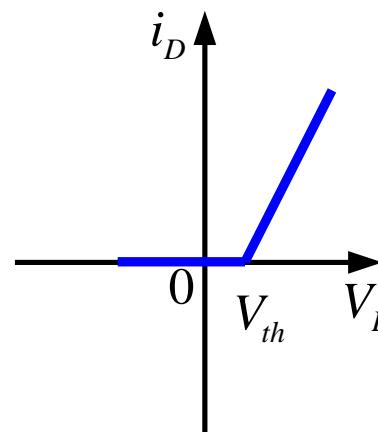


(a)



(b)

恒压降模型：
将正向导通电
压考虑在内的
二极管电路模
型。硅管0.6-
0.7V；锗管0.2-
0.3V



分段线性（折线）模型

4.二极管基本电路模型

- 二极管是无源器件，其作用相当于一个非线性电阻。
 - 二极管的单向导电性决定了其具有整流(rectify)功能。利用这个特性可实现电源变换、信号检波、过电压保护和信号隔离的功能，电路如图5-2-4所示。

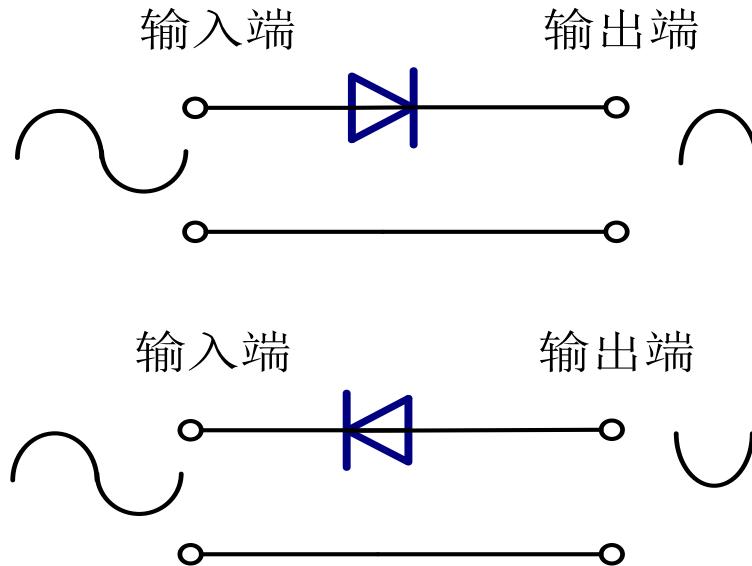
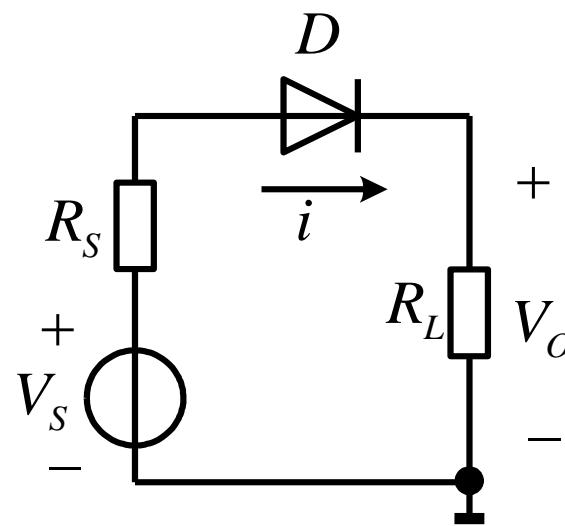
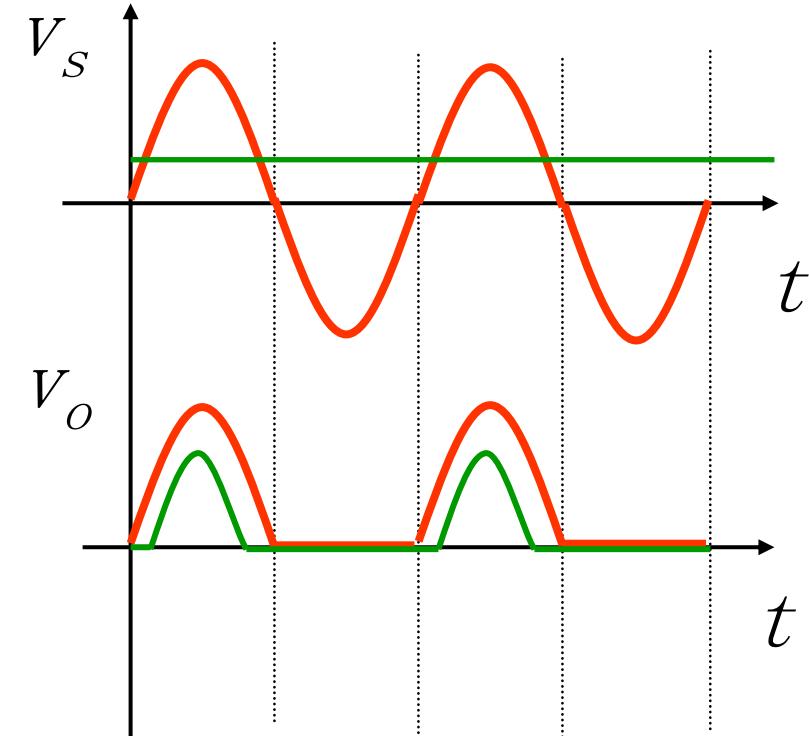


图5-2-4 二极管的整流作用

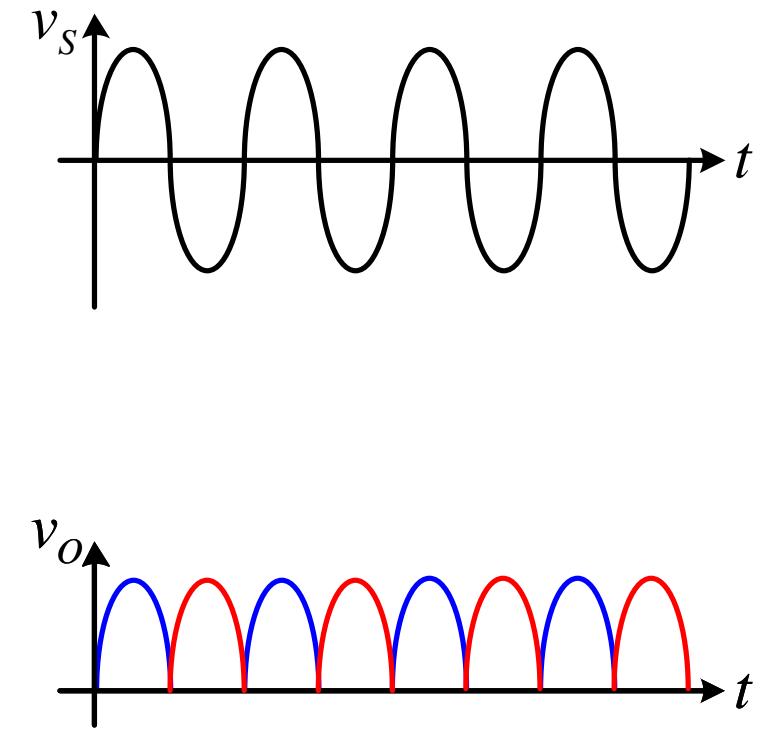
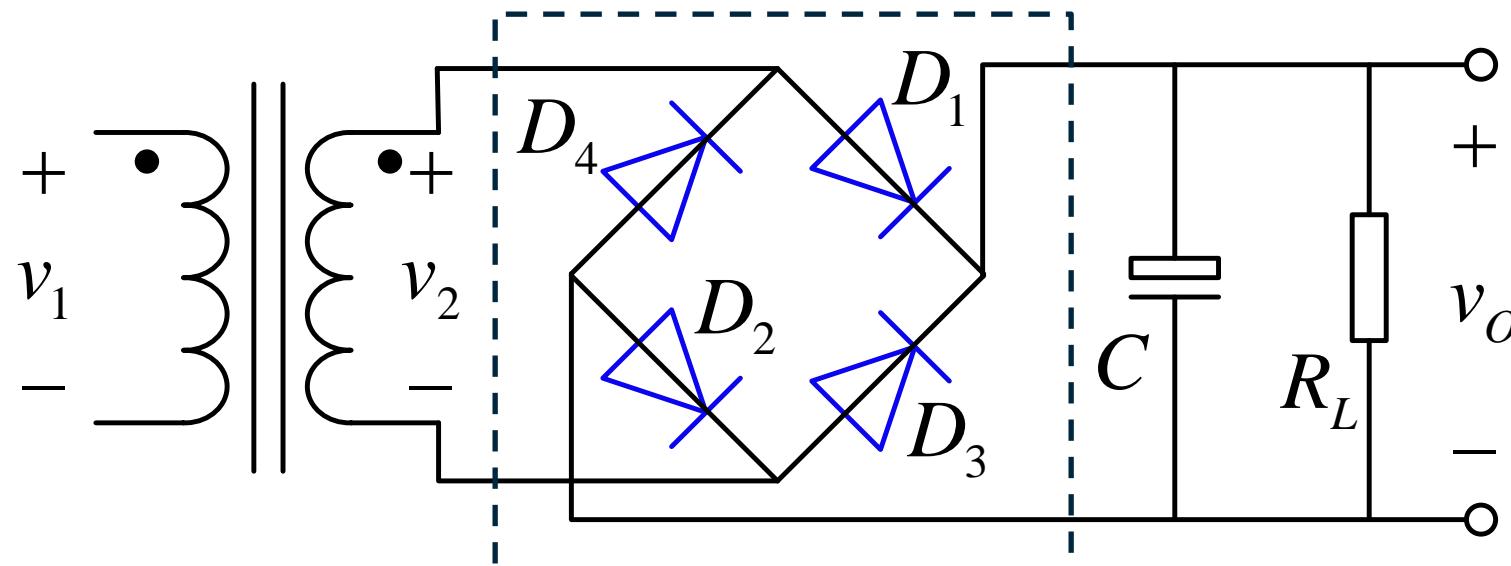


半波整流电路



4.二极管基本电路模型

全波整流电路举例

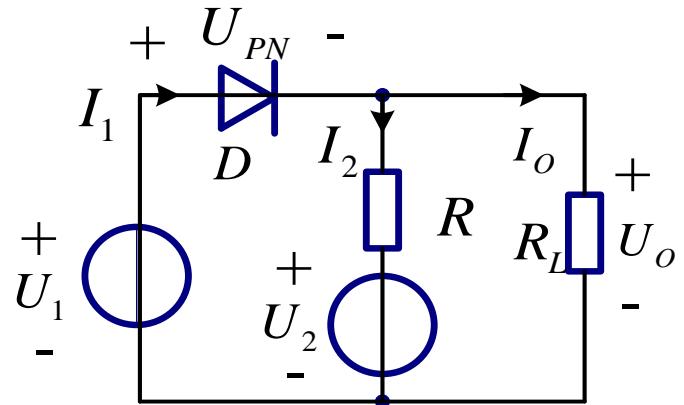


例5-3

试求如图硅二极管电路中电流 I_1 、 I_2 、 I_o 和输出电压 U_o 值。电路中
 $R=1\text{k}\Omega$ 、 $R_L=3\text{k}\Omega$ 、 $U_1=15\text{V}$ 、 $U_2=12\text{V}$ 。

解：假设二极管断开，则有 R_L 端电压 U_N ：

$$U_N = \frac{R_L}{R_L + R} \times U_2 = \frac{3}{3+1} \times 12V = 9V$$



电压关系不符合二极管断开的假设，因此可知二极管应导通。

解续

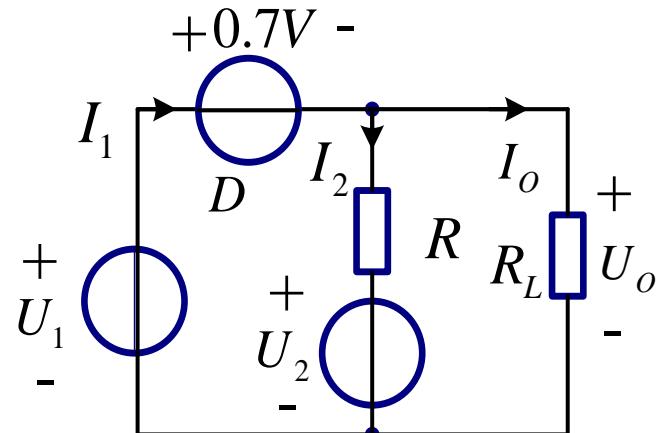
采用恒压降模型，将导通二极管等效为0.7V的恒压源

$$U_o = U_1 - U_{PN} = 15 - 0.7 = 14.3V$$

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} = \frac{14.3}{3} = 4.8mA$$

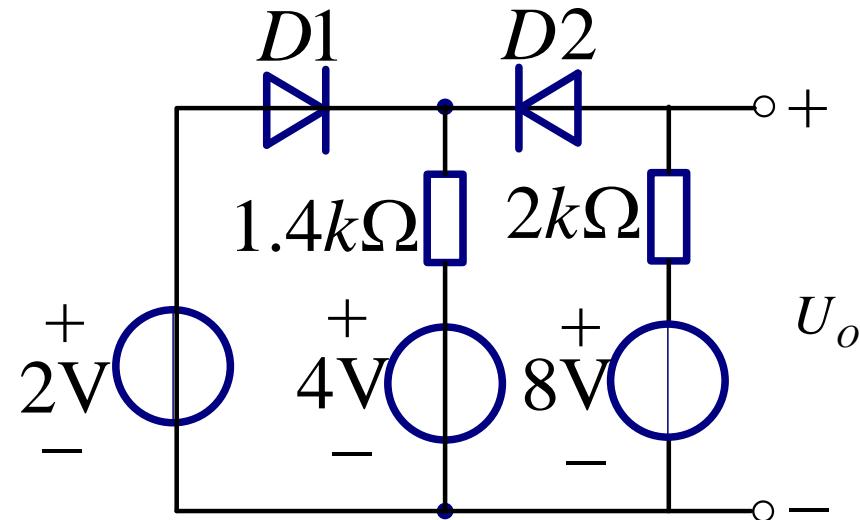
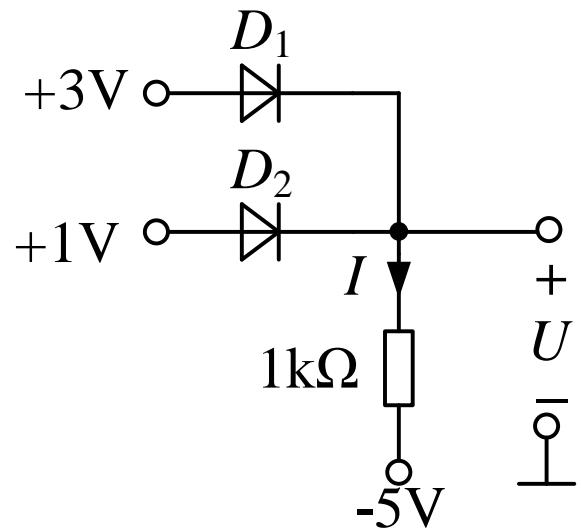
$$I_2 = \frac{U_o - U_2}{R} = \frac{14.3 - 12}{1} = 2.3mA$$

$$I_1 = I_o + I_2 = 4.8 + 2.3 = 7.1mA$$



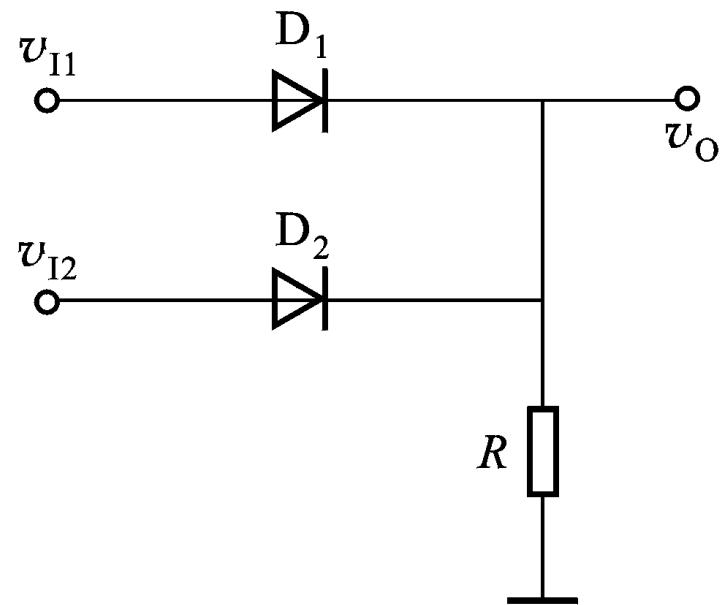
等效电路

例子：判断二极管的通断



例子：二极管门电路

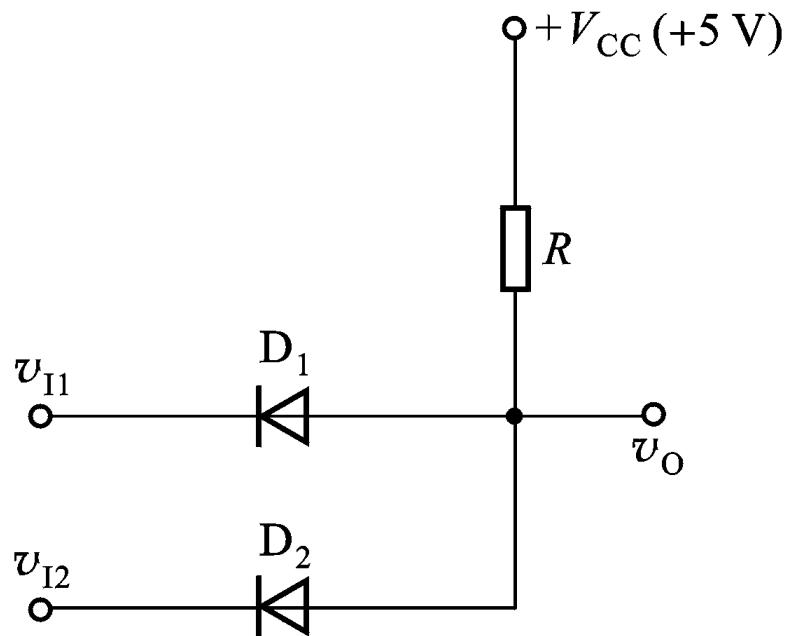
二极管或门



v _{I1}	v _{I2}	D ₁	D ₂	v _O
0V	0V	截止	截止	0V
0V	5V	截止	导通	5V (4.3)
5V	0V	导通	截止	5V (4.3)
5V	5V	导通	导通	5V (4.3)

例子：二极管门电路

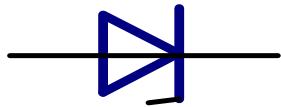
二极管与门



v_{I1}	v_{I2}	D_1	D_2	v_o
0V	0V	导通	导通	0V (0.7)
0V	5V	导通	截止	0V (0.7)
5V	0V	截止	导通	0V (0.7)
5V	5V	截止	截止	5V

5.二极管的分类

- ① 通用二极管 (General purpose diode)
- ② 高频二极管 (High frequency diode)
- ③ 稳压二极管 (齐纳二极管Zener diode)



稳压二极管的电路符号

- 稳压二极管工作在击穿区。由于齐纳击穿效应，在维持一定的电流条件下，二极管的反向偏置电压会稳定在一个固定数值上，当反向偏置电压撤销后，能恢复原来状态。
- 主要用于电压限制和调整，也可以作为电路的过电压保护器件

5.二极管的分类

④ 功率二极管 (Power diode)

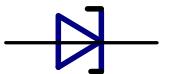
- 允许通过大电流，对电源系统实现整流。由于需要通过大电流，所以功率二极管的结面积比较大，因此不适合于高频条件下使用。

⑤ 肖特基二极管 (Schottky diode)

- 利用金属与半导体接触所形成的势垒来对电流进行控制。
特点：具有较低的正向压降（0.3 V至0.6 V）；多数载流子参与导电，有更快的反应速度。

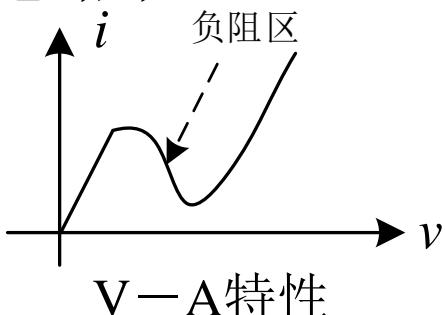
⑥ 隧道二极管 (Tunnel diode)

- 隧道二极管比齐纳二极管具有更大的电压降，可以实现快速击穿。从V-A特性可以看出，隧道二极管具有一段负电阻区，可用在高频电路中。



电路符号

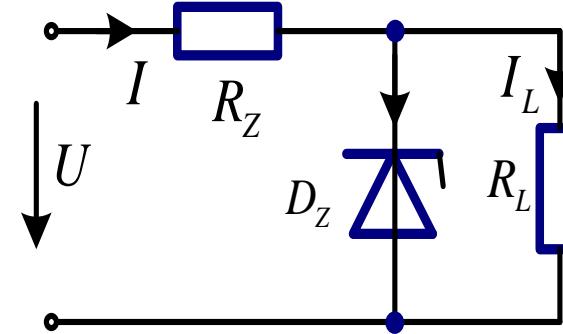
隧道二极管的电路符号



V-A特性

例5-5

图示稳压电路，电源电压 $U=12V$ ，稳压管的稳定电压为 $U_Z=6V$ ，最大稳定电流 $I_{Zmax}=18mA$ ， $R_Z=1k\Omega$ ， $R_L=5k\Omega$ 。试求 I_L ， I_Z 的值，并分析电压稳定过程。



解：先判断稳压管的工作情况，断开稳压管 D_Z ，则支路 R_L 上的电压为 $U_{RL}=\frac{U}{R_Z+R_L}\times R_L=\frac{12}{5+1}\times 5=10V$

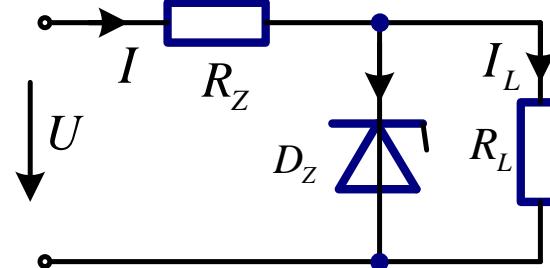
因为 $U_{RL}>U_Z$ ，说明稳压管被击穿，因此电阻 R_L 两端的电压被限制在6V。则

$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{6}{5} = 1.2mA$$

$$I = \frac{U - U_Z}{R_Z} = \frac{12 - 6}{1} = 6mA$$

于是

$$I_Z = I - I_L = 6 - 1.2 = 4.8mA$$



由于 $I_Z < I_{Z\max}$ ，稳压管处在正常工作状态。

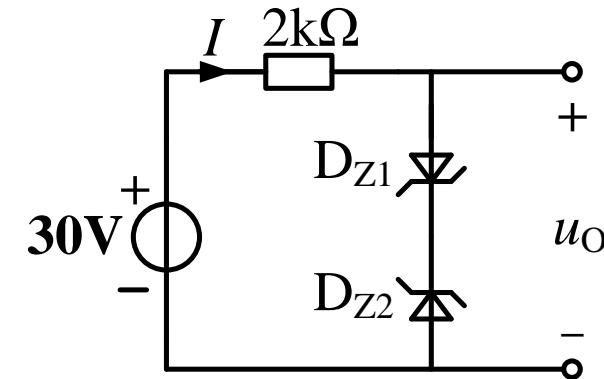
稳压管稳压过程如下：

$$U \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow U_{RZ} \uparrow \rightarrow U_Z \downarrow$$

当电源电压下降时，上述过程相反。

上述分析表明，稳压管的稳压作用是通过限流电阻R_z的电流调节作用实现的。

电路如图 9 所示，稳压管 D_{z1} 与 D_{z2} 的稳压值分别 6V 和 9V，稳定电流是 5mA, 正向压降为 0.7V, 求电压 u_O 及电流 I



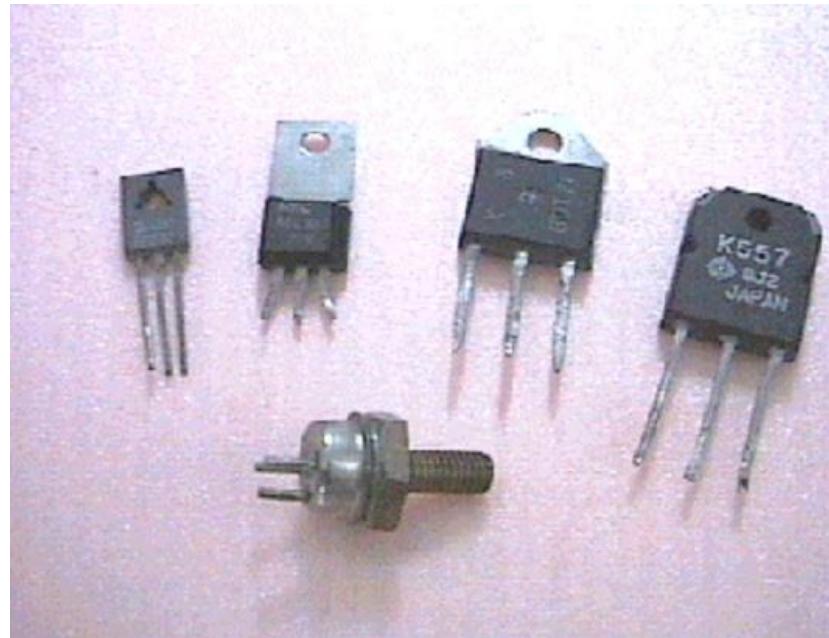
5-3 双极型晶体三极管

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

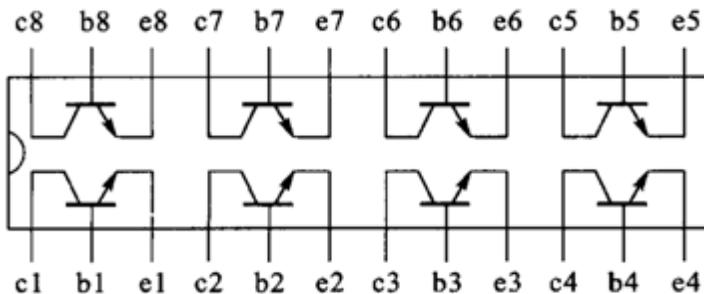
1. 三极管工作原理

双极型晶体管简称晶体管 (BJT , Bipolar Junction Transistor) , 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。

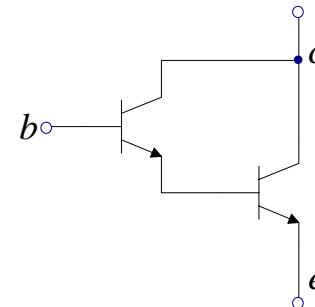


4.三极管分类

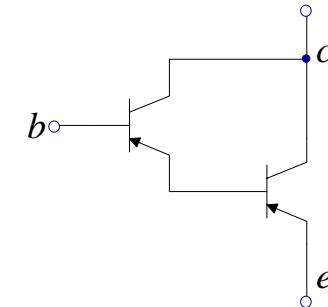
1. 按照结构工艺分类，有PNP和NPN型
2. 按照制造材料分类，有锗管和硅管
3. 按照工作频率分类，有低频管和高频管
4. 按照允许耗散的功率大小分类，有小功率管和大功率管
5. 多管阵列



6. 达林顿管
7. 光敏三极管

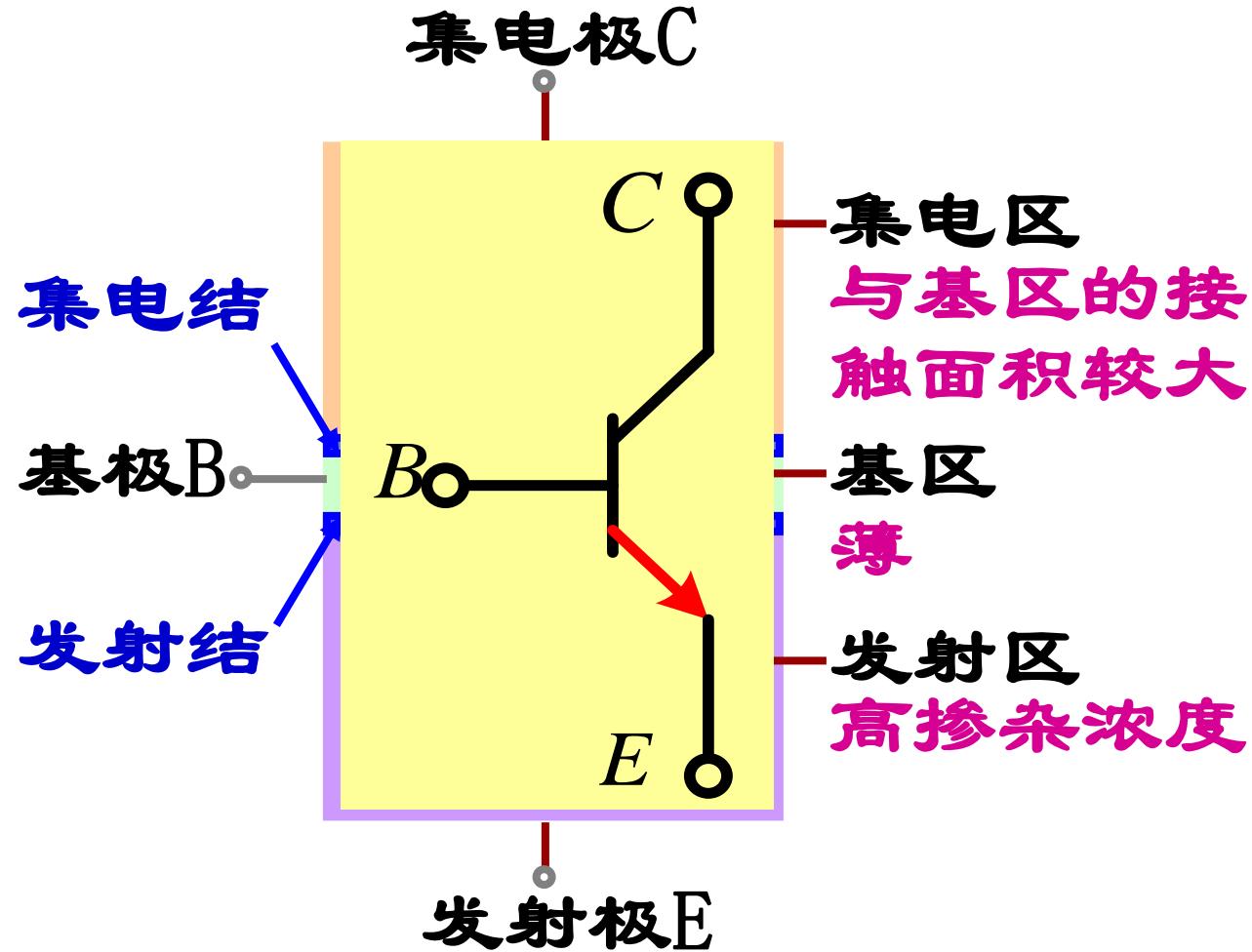


NPN型达林顿管

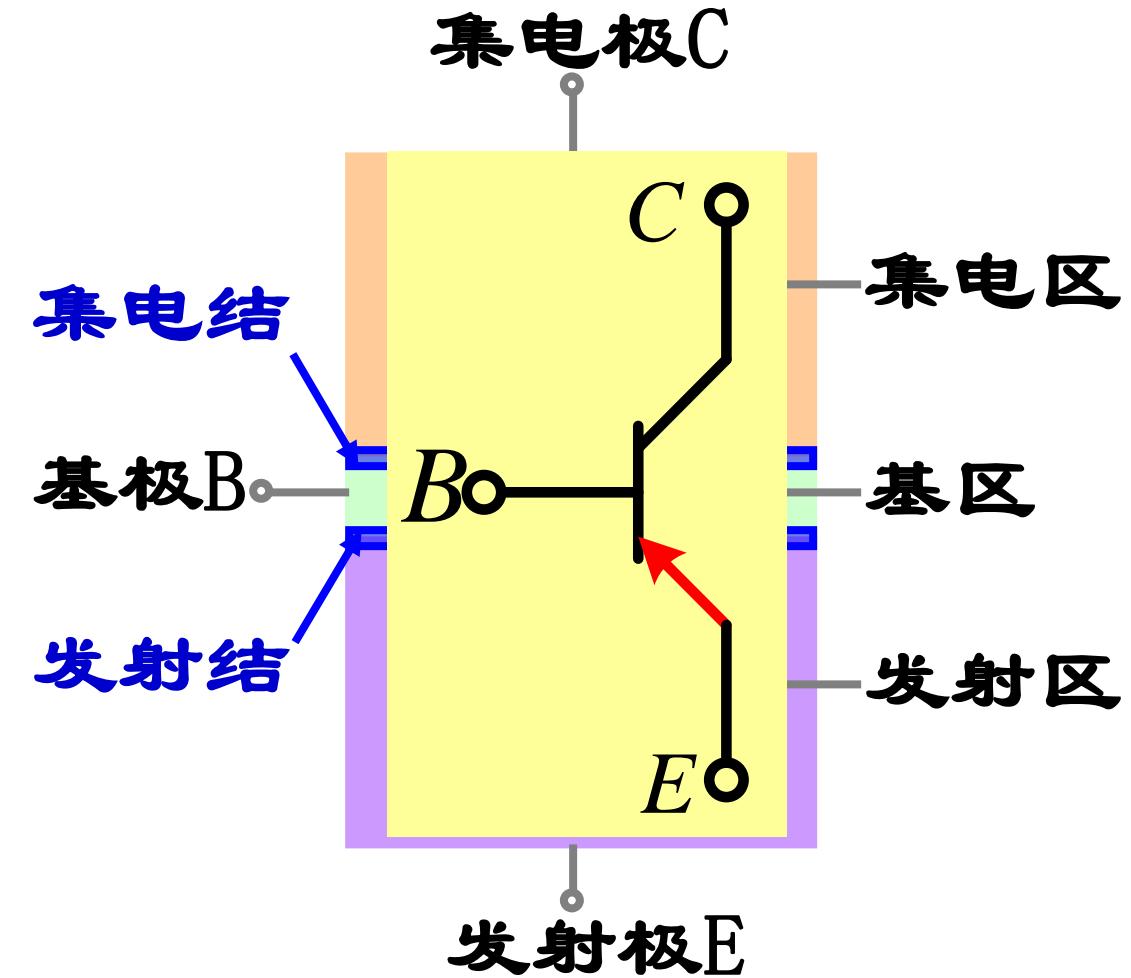


PNP型达林顿管

1. 三极管工作原理



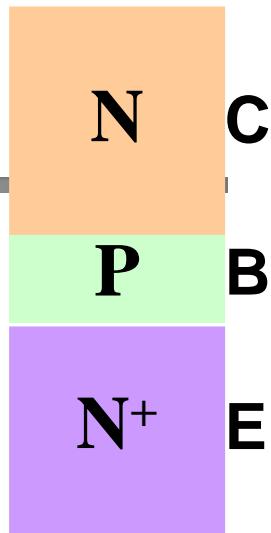
NPN型三极管的结构



PNP型三极管的结构

1. 三极管工作原理

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



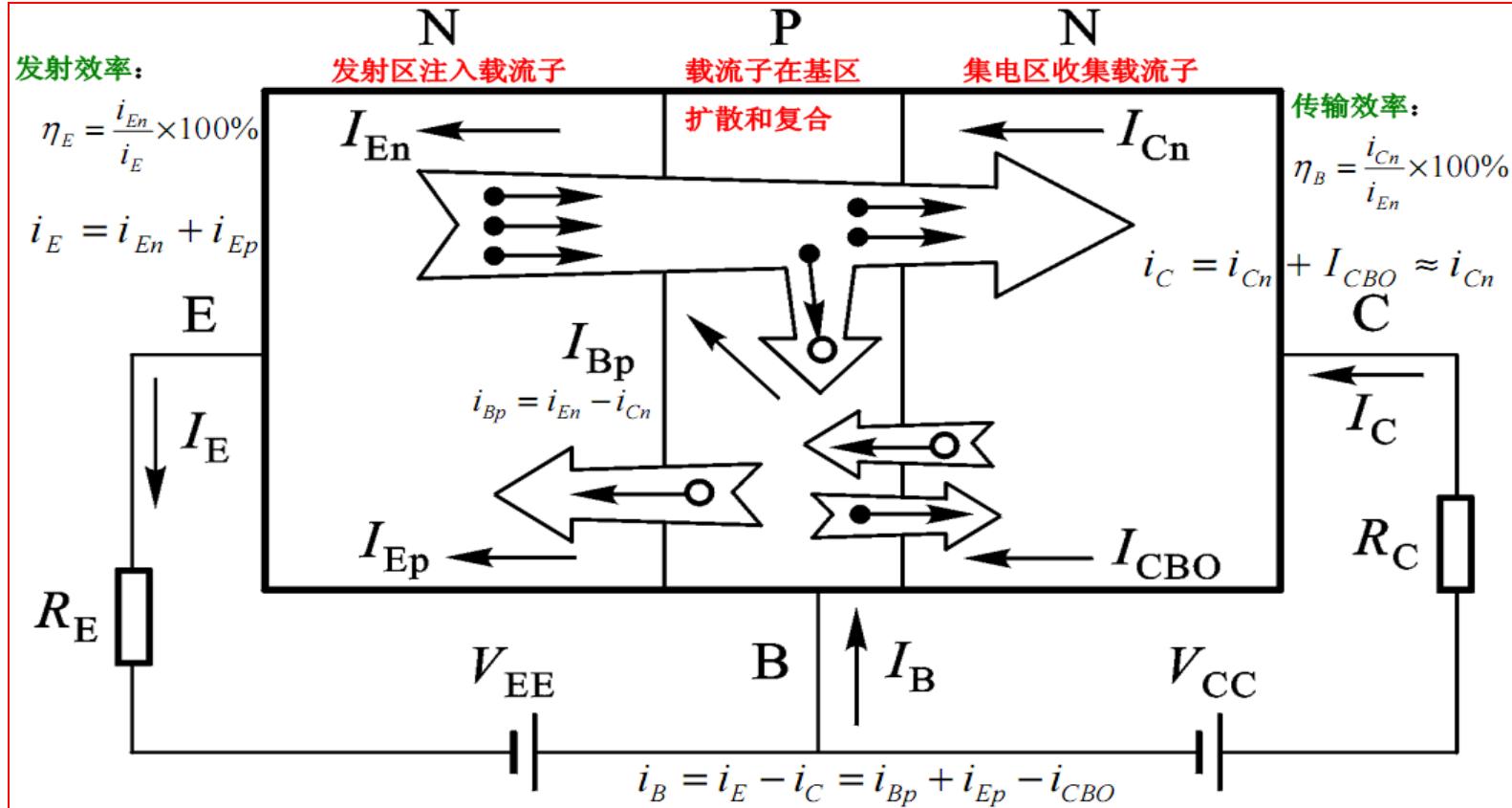
集电结 发射结	正偏 (不要求导通)	反偏
正偏(应处于导通状态)	饱和 	放大
反偏	倒置 	截止

“放大”一般应用在“**小信号放大**”场景（大直流偏置+交流小信号输入）。
注意：图中未给出交流小信号的输入位置，这将在后面章节讨论。
其他状态一般应用在“**大信号**”场景，或者异常的小信号放大场景。

if(PNP)?

1. 三极管工作原理

放大状态的讨论



内部条件: 发射区高掺杂；基区薄且低掺杂；集电区面积大。

外部条件: 发射结加正向电压（且导通）；集电结加反向电压（c的电压高于b）。

$$I_E = I_C + I_B$$

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

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

$$I_C \approx \bar{\alpha} I_E$$

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

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

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} \quad \text{此外, 根据KCL} \quad I_E = I_B + I_C$$

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。

例题：工作状态判断

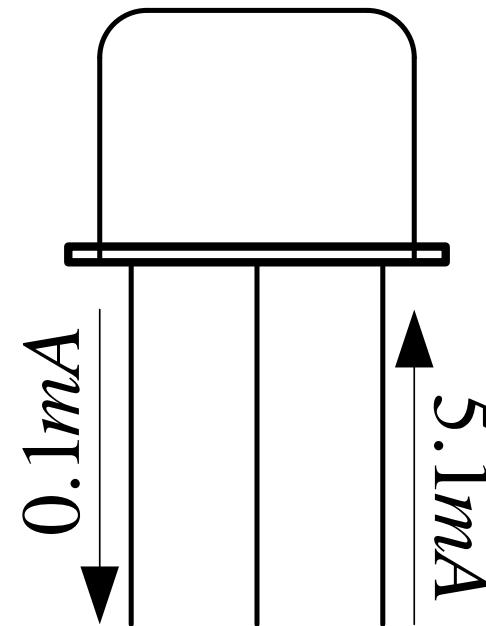
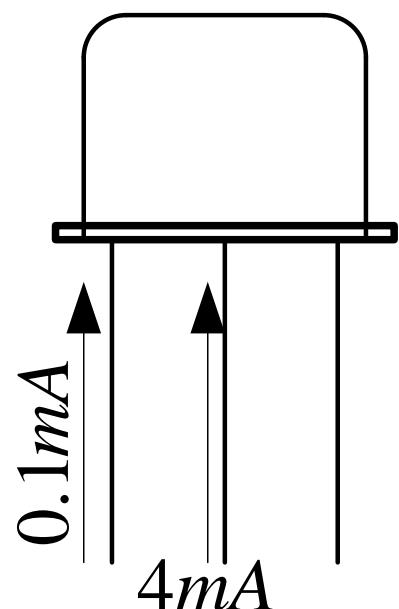
三只硅NPN晶体管的极间电压 V_{BE} 、 V_{CE} 如下表所示。试分析其工作状态(放大、截止或饱和)，填入表中

	V_{BE} / V	V_{CE} / V	V_{BC} / V	工作状态
甲	-6	5	-11	截止
乙	0.7	0.1	0.6	饱和
丙	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 $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$

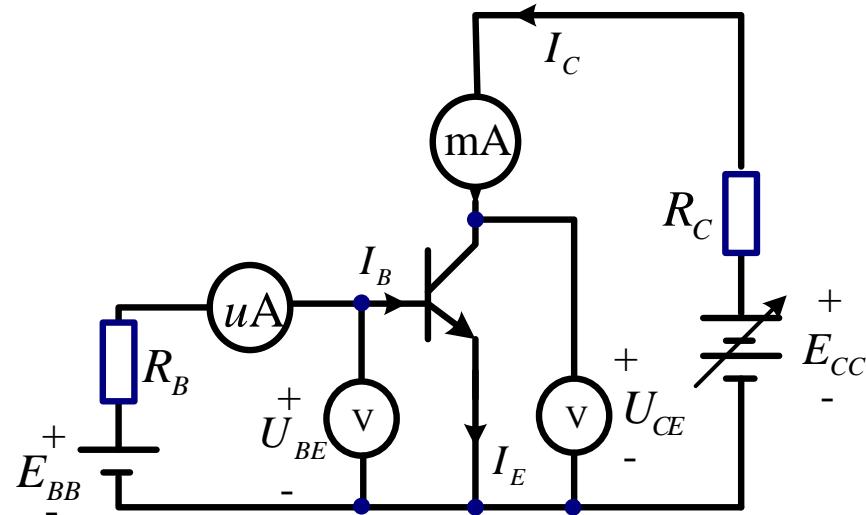


2. 双极性晶体管的特性曲线

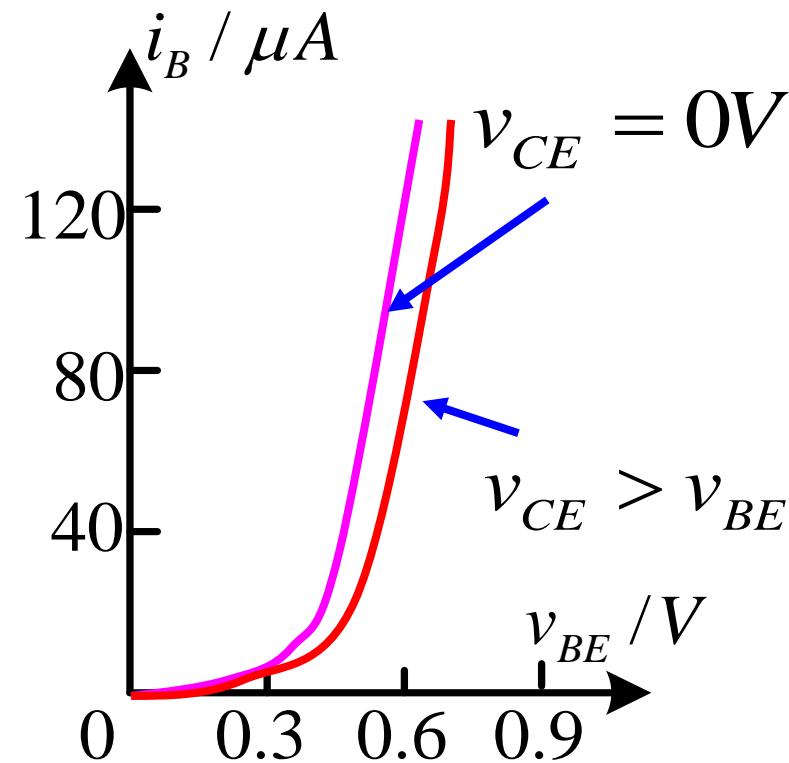
输入特性曲线

以共射极连接方式组成的放大电路为例

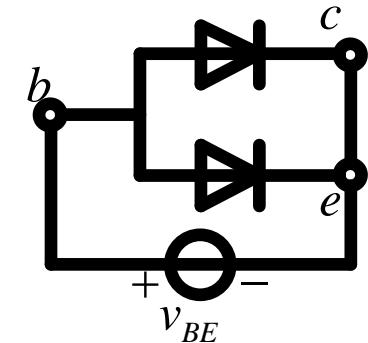
$$i_B = f(v_{BE}) \Big|_{v_{CE}=\text{常数}}$$



三极管共射极放大测试电路



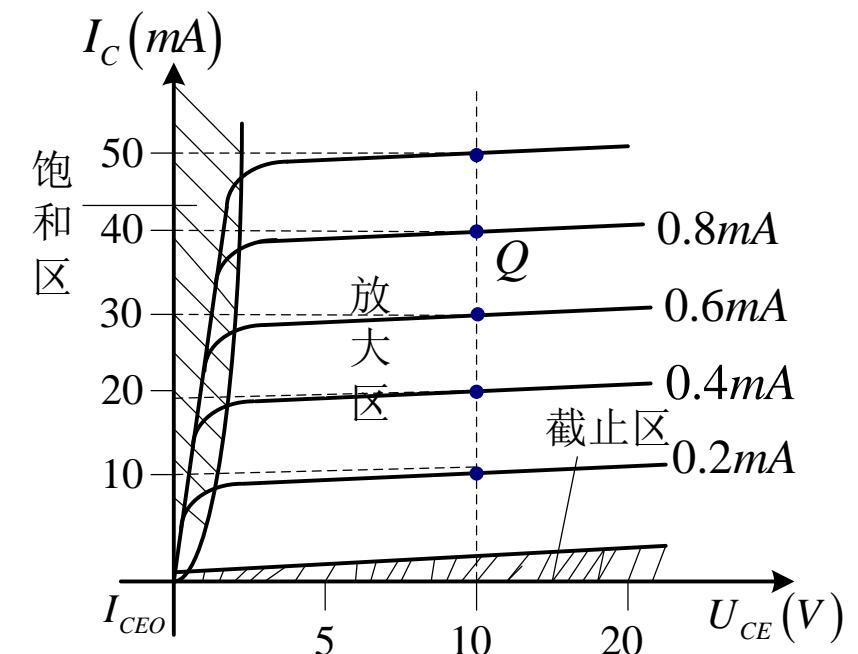
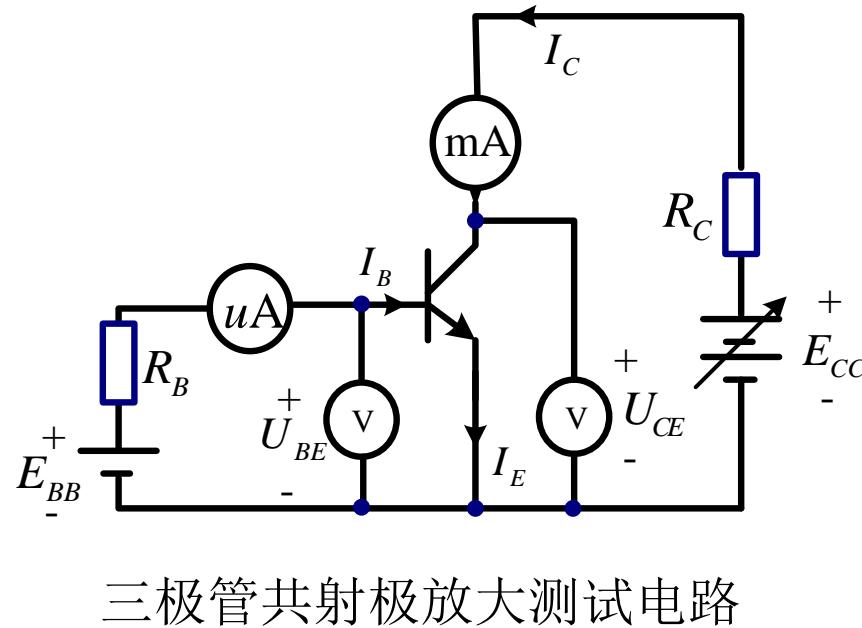
if ($v_{CE} = 0$)



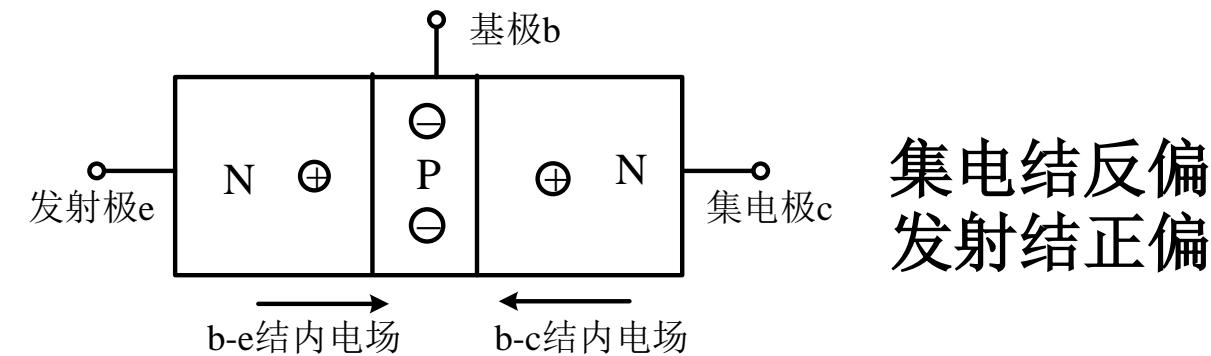
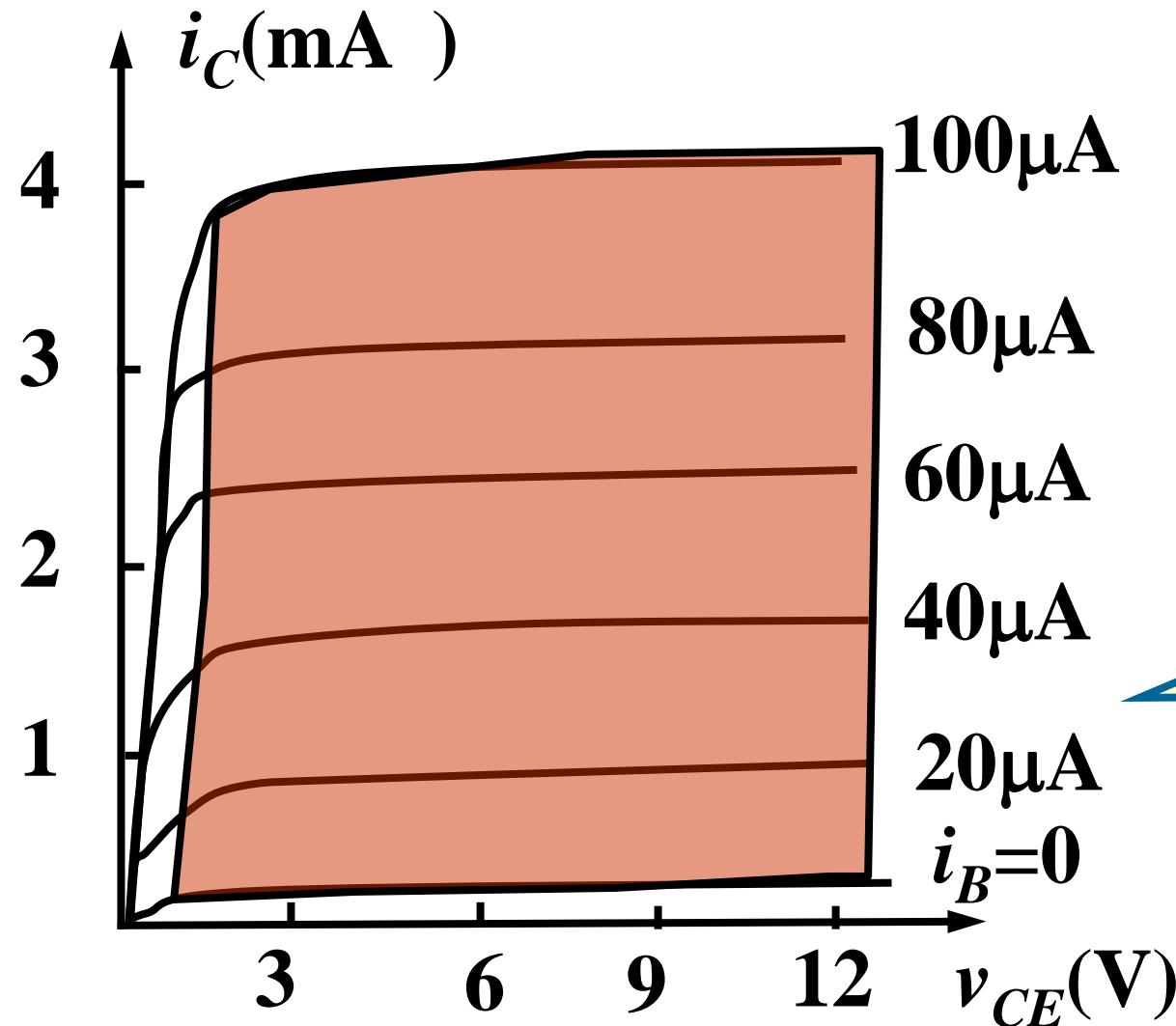
2. 双极性晶体管的特性曲线

输出特性曲线

以输入电流为参变量时： $i_C = f(v_{CE}) \Big|_{i_B=\text{常数}}$



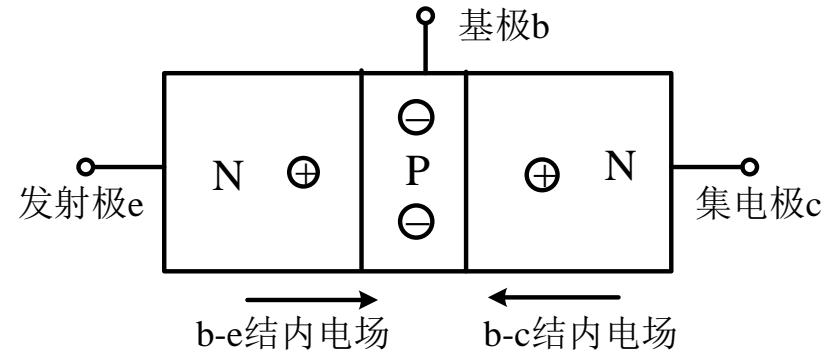
2. 双极性晶体管的特性曲线



集电结反偏
发射结正偏

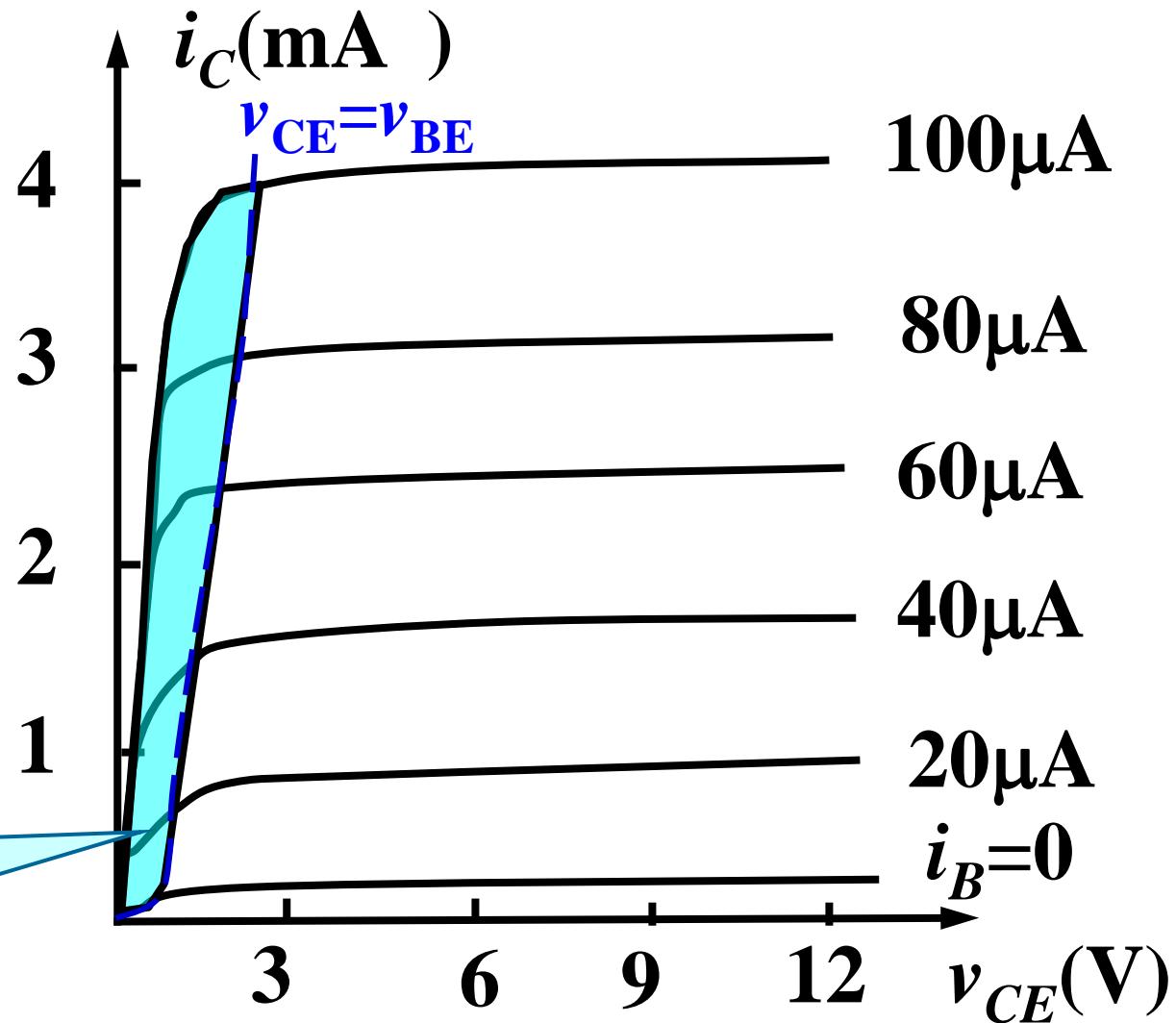
此区域满足
 $i_C = \bar{\beta} i_B$ 称为线性区（放大区）。
 i_C 只与 i_B 有关，
和 v_{CE} 基本无关

2. 双极性晶体管的特性曲线

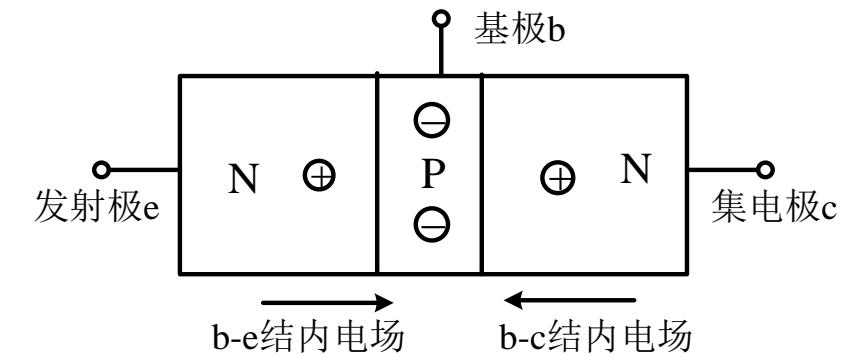
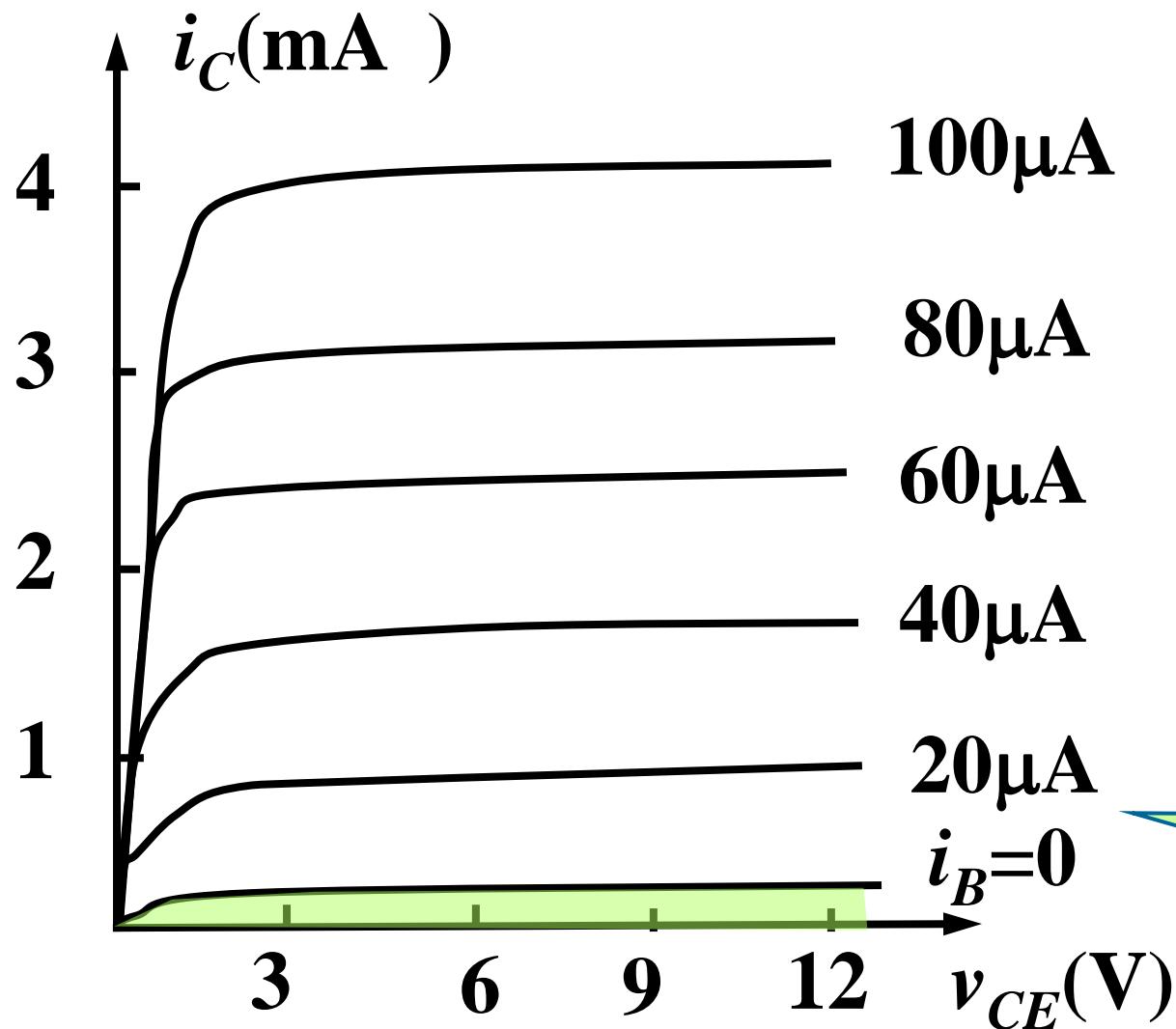


集电结正偏
发射结正偏

此区域中 $V_{CE} < V_{BE}$,
 $\beta i_B > i_C$, V_{CE} 较小,
称为饱和区。



2. 双极性晶体管的特性曲线



集电结反偏
发射结反偏（或死区）

此区域中： $i_B \leq 0$,
 $i_C \leq I_{CEO}$, 称为截止区。
 $V_{BE} <$ 死区电压,

2. 双极性晶体管的特性曲线

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 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$

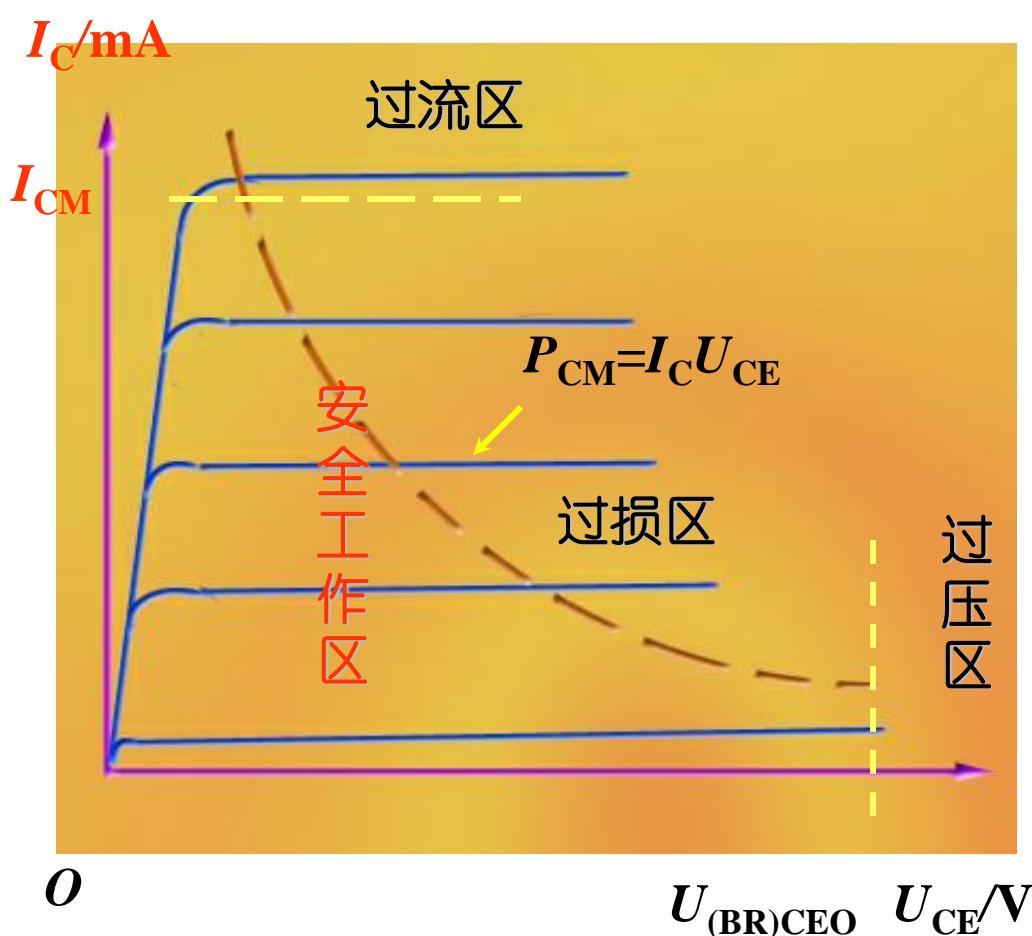
(2) 饱和区：发射结正偏，集电结正偏。

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

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

2. 双极性晶体管的特性曲线

三极管的极限参数（了解）



集电极最大允许电流 I_{CM}

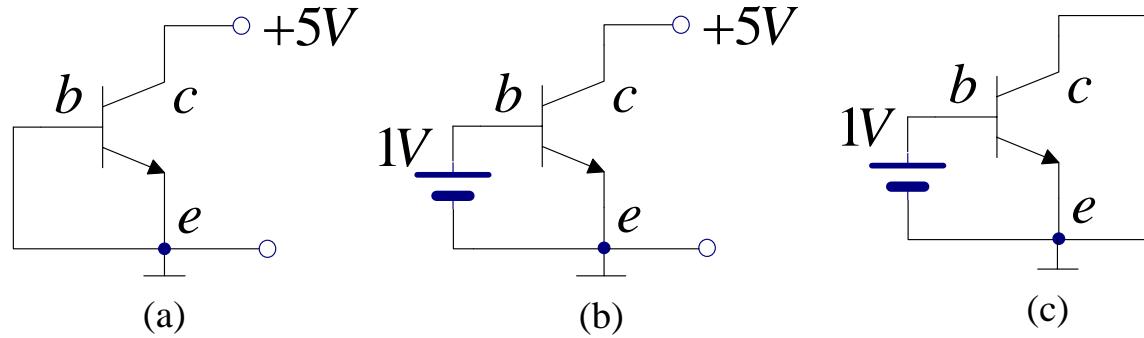
集-射反向击穿电压 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}$

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。

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。



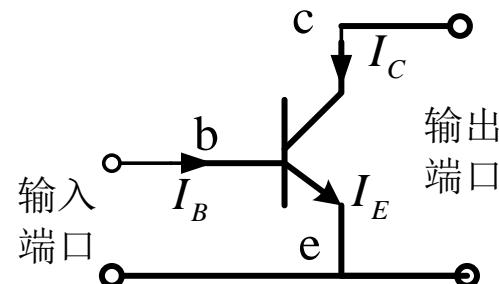
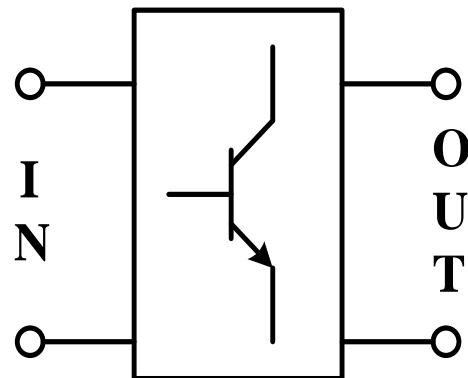
解：(a) (c) 2个电路不能满足放大状态的偏置条件，不具备电流放大能力（截止、饱和）。

(b) 电路满足放大状态的偏置条件（1V最好改成0.7V），具有电流放大能力。

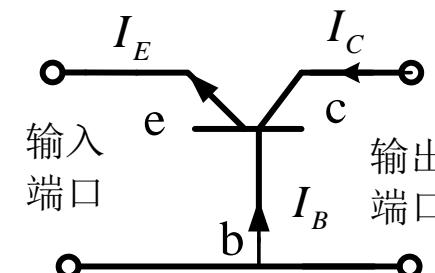
2. 双极性晶体管的特性曲线

三极管的三种连接方式（**交流组态**）

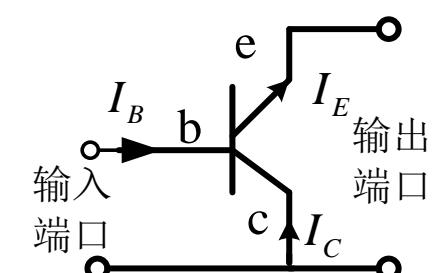
三极管有三个电极，其中一个作为输入端，一个作为输出端，另外一个电极是输入回路和输出回路的公共端。



(a)共发射极



(b)共基极

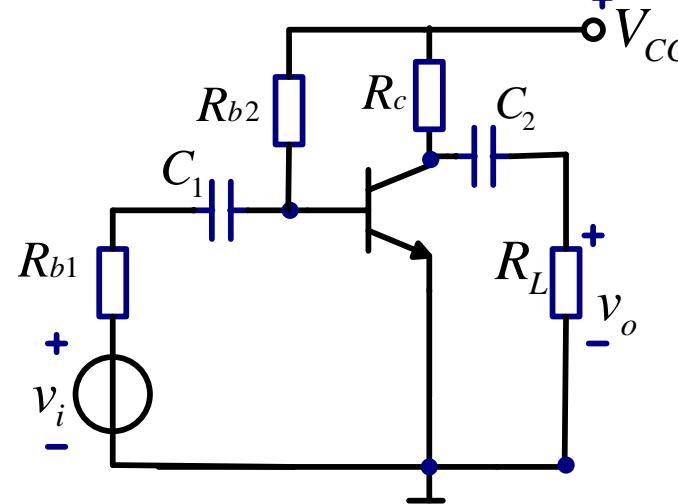


(c)共集电极

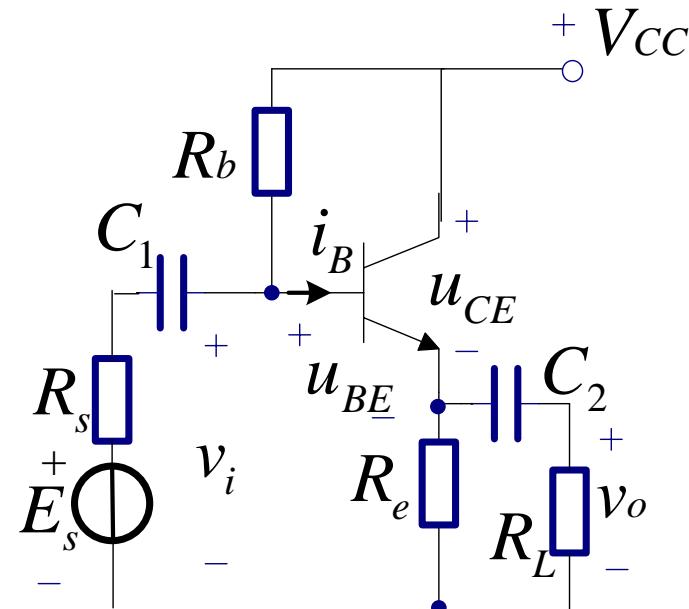
这三个图只描述信号的输出输出位置，没有画直流偏置内容

2. 双极性晶体管的特性曲线

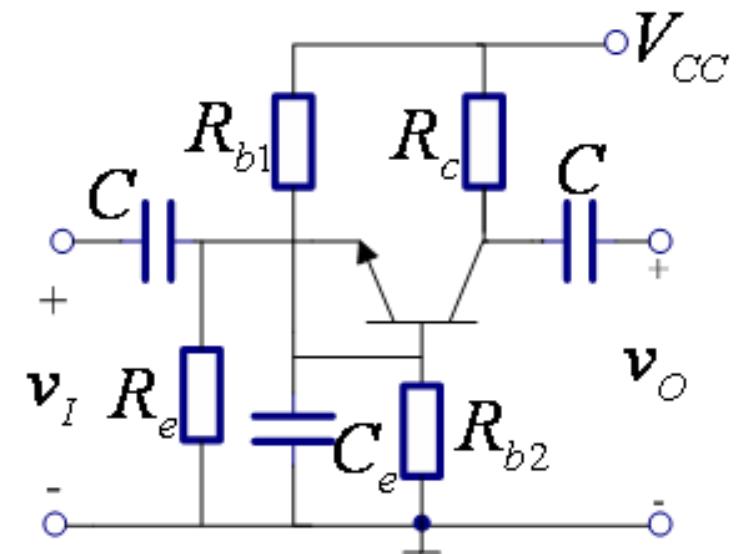
完整的三种组态电路(放大工作状态+不同的（交流信号）组态)



共射极放大电路



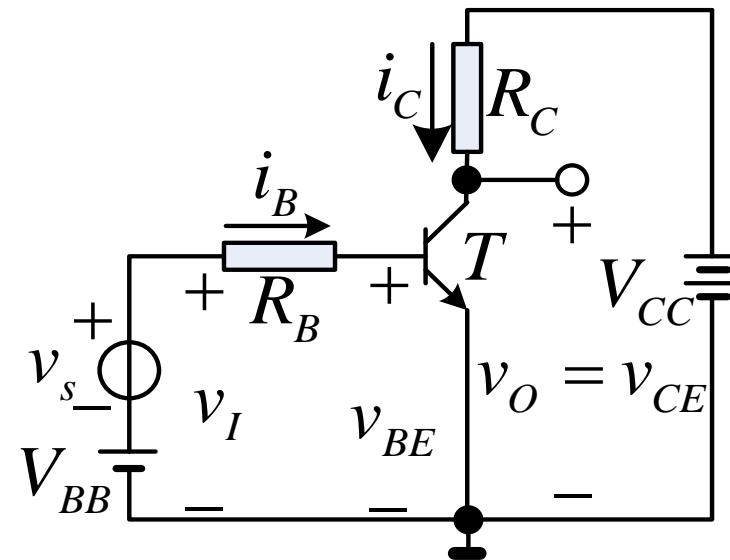
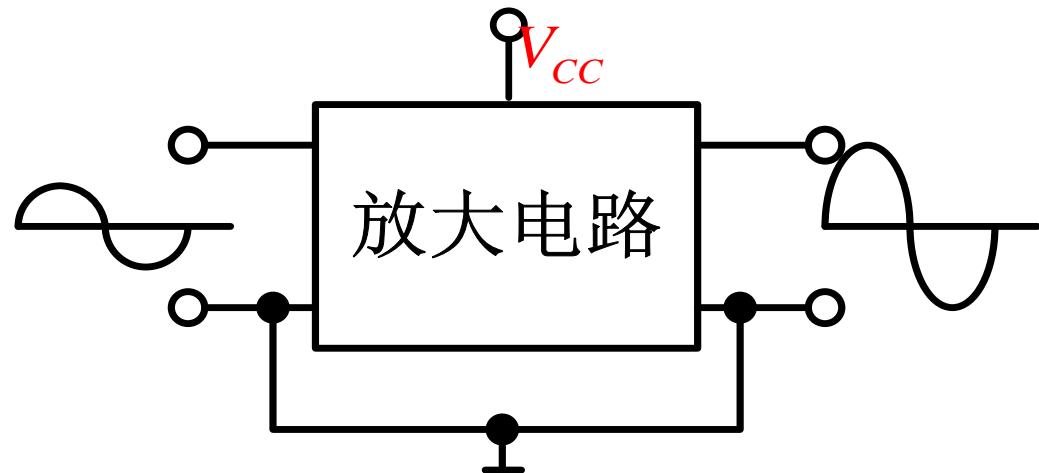
共集电极放大电路



共基极放大电路

5 三极管的低频小信号电路模型

- 放大电路的概念：
 - 将微弱输入信号不失真地增强，使输出电压或电流在幅度上得到放大，从而可以得到所需要的功率。
 - 由于信号是连续的，称为模拟信号。处理模拟信号的电路称为模拟电路。



5 三极管的低频小信号电路模型

放大电路分析的基本思路

问题

- 纯交流信号无法使三极管保持在放大状态（无法进行线性放大）
- 放大的能量从哪来

首先分析直流偏置是否有效

- 三极管是否在放大状态
- 交流信号的幅度限制

再分析交流小信号的放大效果

- 如何评价小信号放大能力

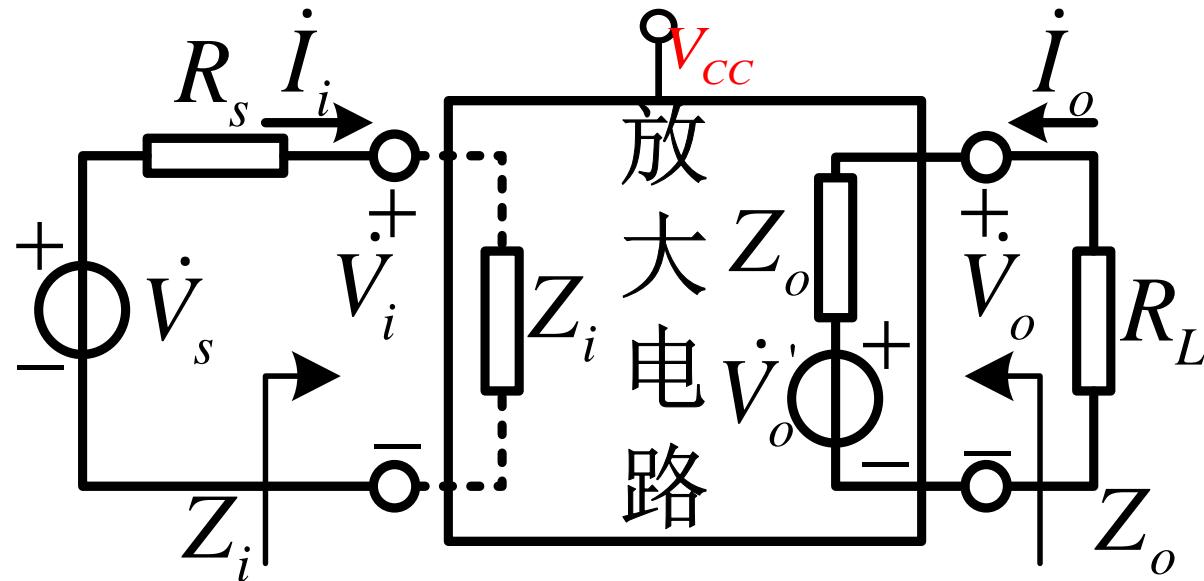
低频交流小信号模型的用途

分析放大电路的限制

- 频率限制
- 失真问题

5 三极管的低频小信号电路模型

放大电路的主要性能指标



电压放大倍数 $\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$

输入阻抗 $Z_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{I}_i}$

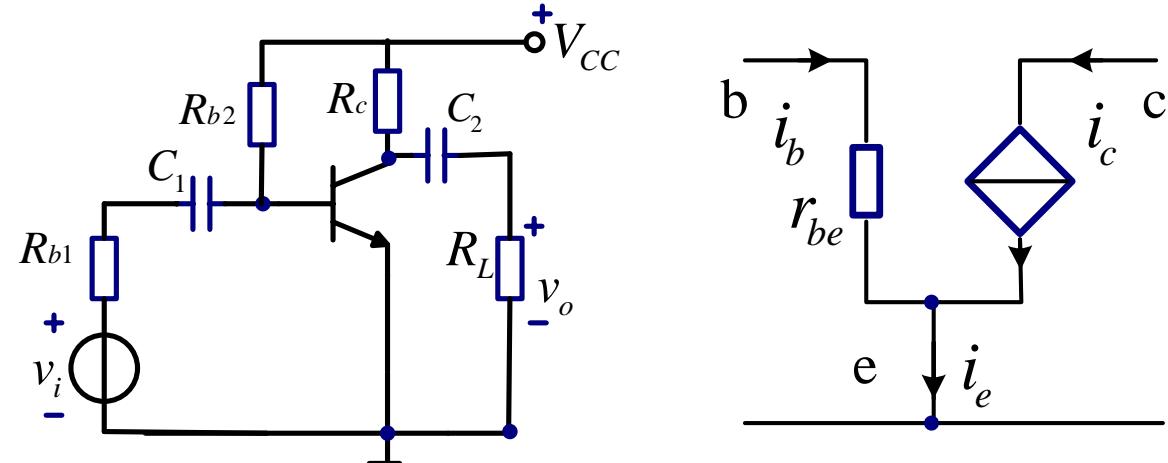
输出阻抗：输出端戴维南等效阻抗。

5 三极管的低频小信号电路模型

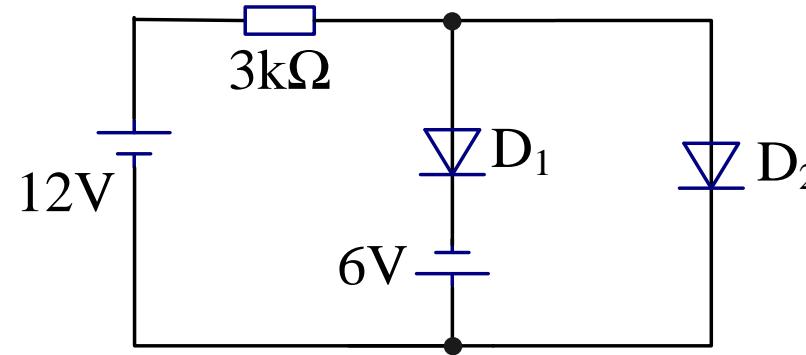
低频小信号模型是分析三极管低频小信号电路的简化方法，可以用来分析电路的输入阻抗、输出阻抗和放大倍数等，该方法需要满足两个前提条件：

低频——电路信号频率较低。三极管的结电容忽略不计。

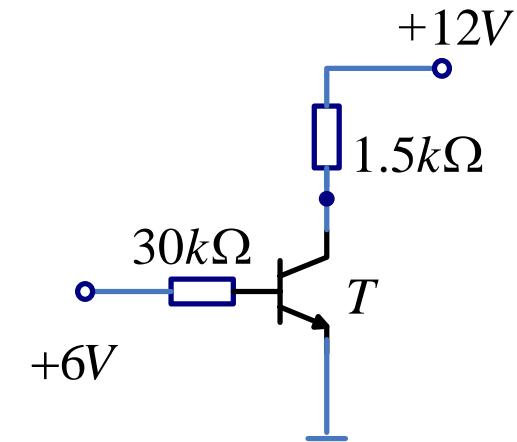
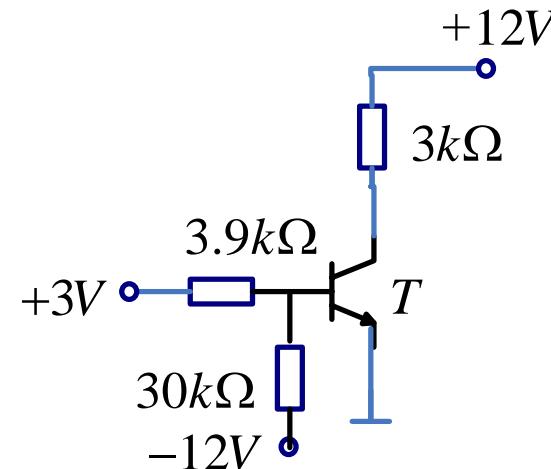
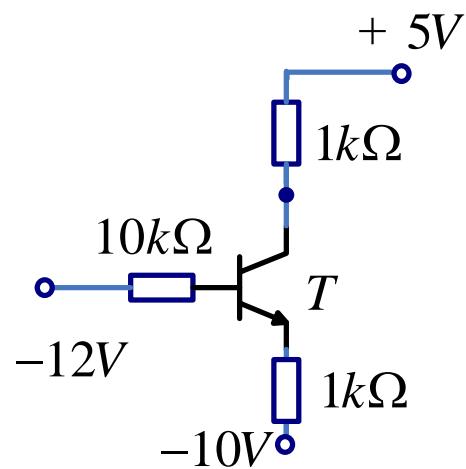
小信号——一是输入信号电压幅度的变化使三极管基极电流动态变化的范围较小，处于放大区，基极电流的变化可近似为线性。二是小信号时三极管的输入和输出特性可以被看成是线性的，三极管近似成一个线性器件。



补充5-1



补充5-2



$$\beta = 30$$