



第六章 半导体二极管和晶体管

§ 6.1 半导体基础知识

- 导体：电阻率小于 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$
如：铜、铁、铝等金属材料
- 绝缘体：电阻率大于 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$
如：橡胶、塑料等
- 半导体：电阻率介于 $10^{-4}\sim 10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 之间
如：硅、锗、砷化物等



§ 6.1.1 本征半导体

不含杂质的半导体称为**本征半导体**。

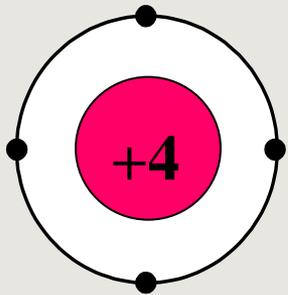
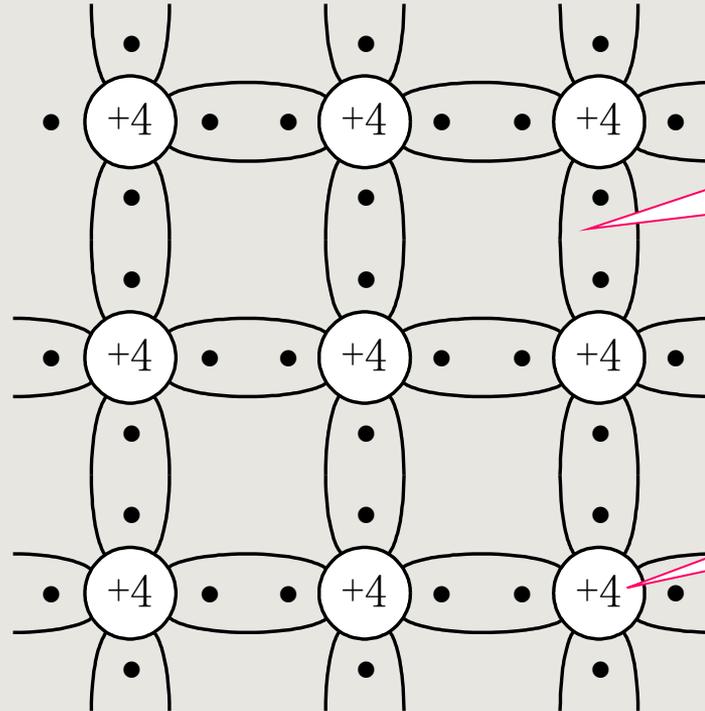


图6.1.1 硅和锗的原子结构简化模型

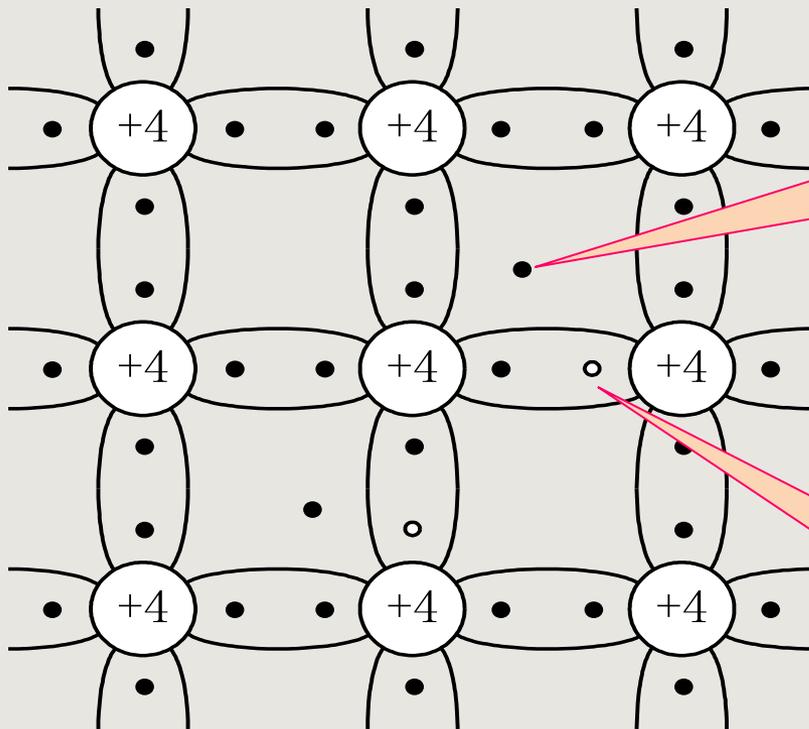


二个电子的共价键

正离子



电子—空穴对的产生



受热挣脱共价键束缚形成自由电子

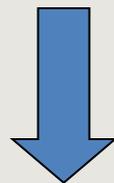
形成电子—空穴对

共价键中原来位置留下一个空位



在外电场作用下

束缚电子： $x_2 \rightarrow x_1$ ， $x_3 \rightarrow x_2$ ；
相当于空穴： $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$



空穴电流

电子运动

半导体中有两部分电流：
本征激发的自由电子形成电子电流；
空穴移动产生的空穴电流

自由电子与空穴都称为**载流子**，在本征
半导体中，自由电子和空穴的数目相同

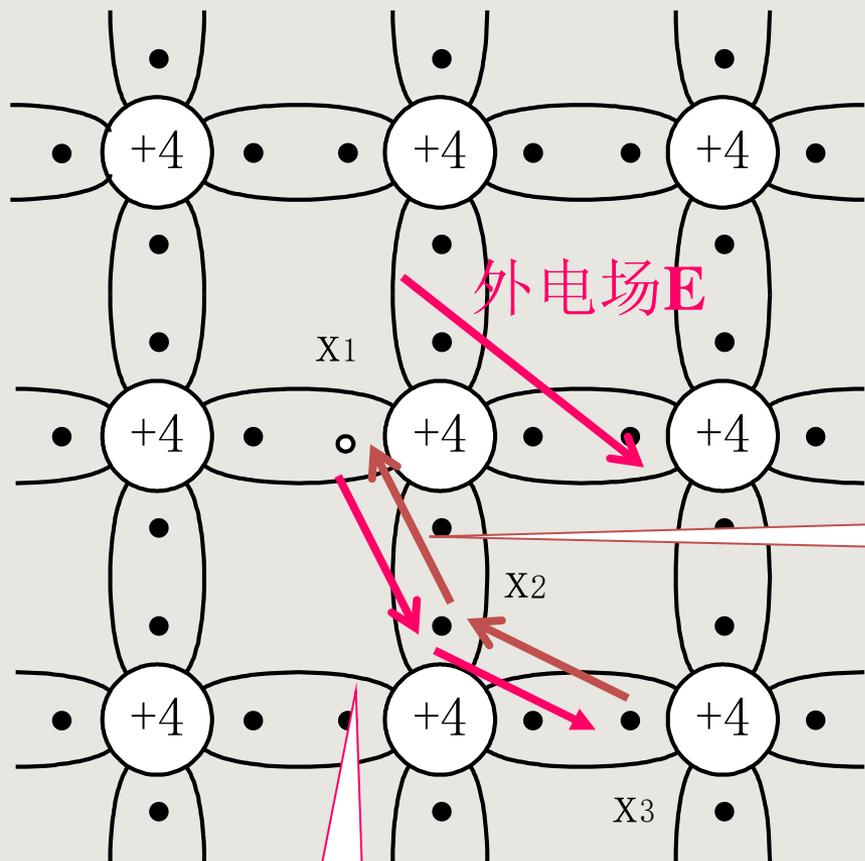


图6.1 电子与空穴的移动

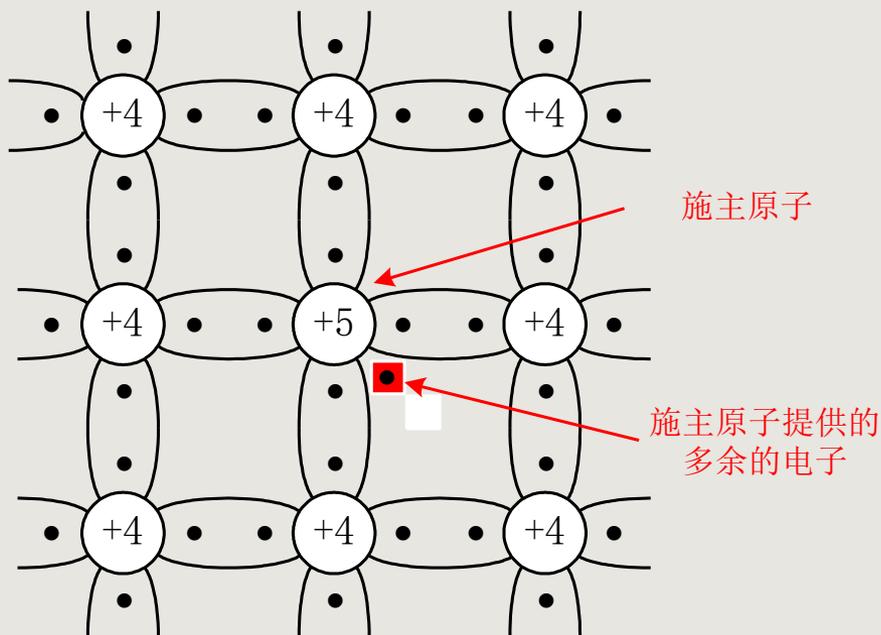
空穴运动

§ 6.1.2 杂质半导体

N 型半导体（电子型半导体）和 **P** 型半导体（空穴型半导体）

1. N型半导体

掺入**五价**杂质元素：杂质原子提供多余的电子



电子是多数载流子
空穴是少数载流子

图6.1.5 N型半导体的晶体结构



2. P型半导体

掺入三价杂质元素：杂质原子提供空穴，

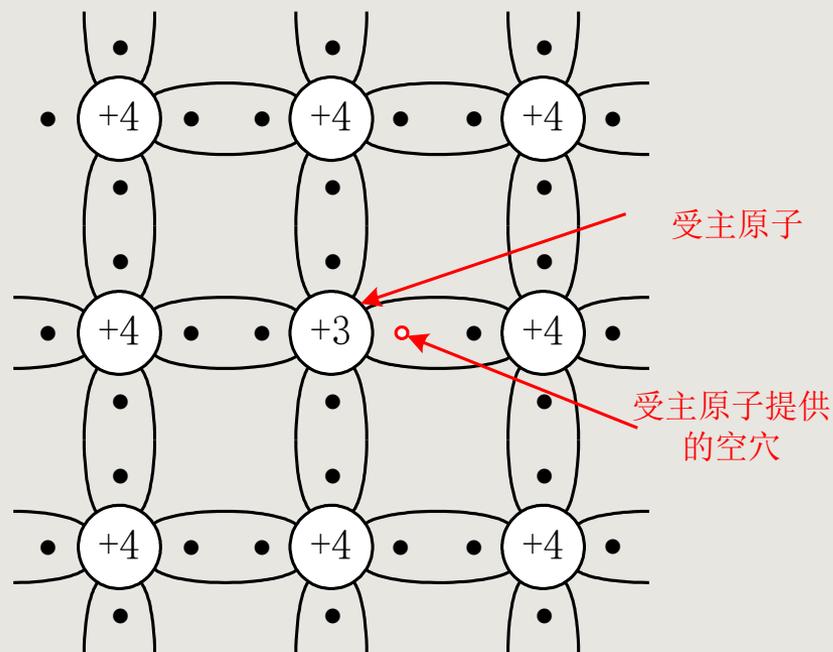


图6.1.6 P型半导体的晶体结构

空穴是多数载流子,电子是少数载流子



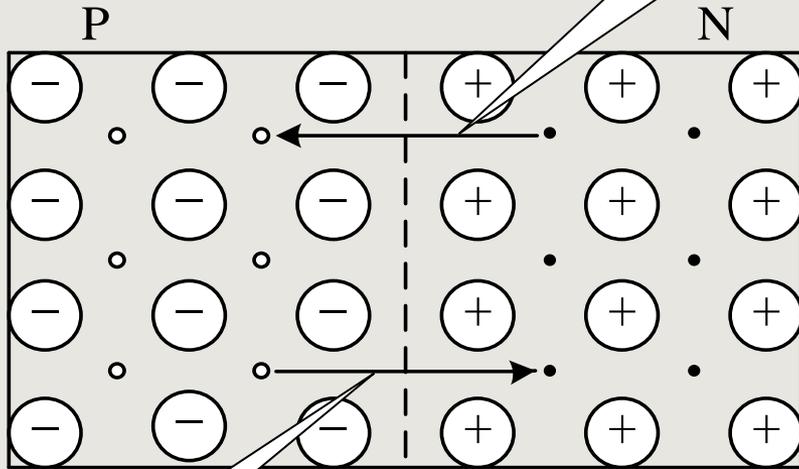
- 在杂质半导体中，多数载流子由掺杂形成，其数量取决于掺杂浓度，少数载流子由本征激发产生，其数量由温度决定。
- 杂质半导体的导电性能由掺杂浓度决定。常温下，即使杂质的浓度很低，多数载流子的数目仍要远远大于少数载流子的数目。



§ 6.1.3 PN结

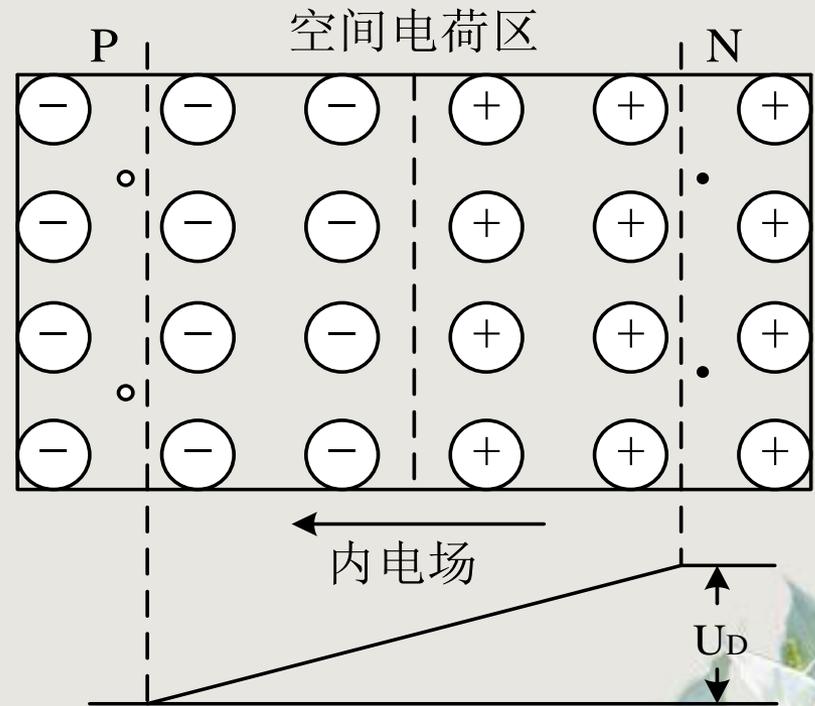
1. PN结的形成

电子
扩散



空穴
扩散

多数载流子的扩散 →
空间电荷区 → 内电场



内电场 → 漂移 → 空间电荷区减小

载流子在电场作用下的向运动称为**漂移运动**

当扩散和漂移达到动态平衡时，空间电荷区的宽度就稳定下来。PN结就处于相对稳定的状态

电位壁垒 U_D 的大小，**硅**材料为**0.6~0.8V**，**锗**材料为**0.2~0.3V**



2. PN结的单向导电性

(1) 外加正向电压

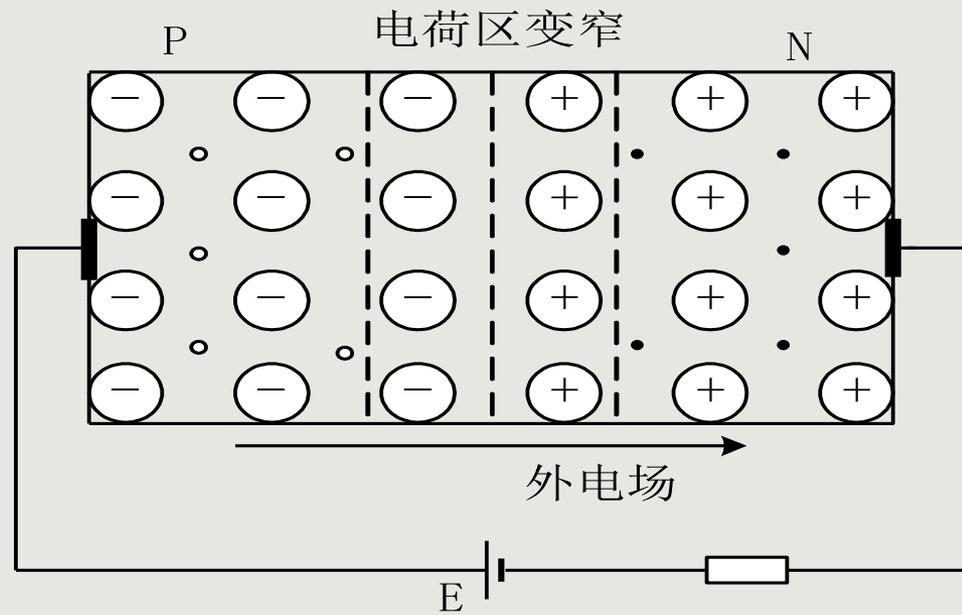


图6.1.8 正向偏置的PN结

外加电压 $P \rightarrow N$ ，外电场削弱内电场，PN结的动态平衡被破坏，在外电场的作用下，P区中的空穴进入空间电荷区，与一部分负离子中和，N区中的自由电子进入空间电荷区与一部分正离子中和，于是整个空间电荷区变窄，从而使多子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流，这个电流称为正向电流，其方向是从P区指向N区。这种外加电压接法称为正向偏置。

(2) 外加反向电压

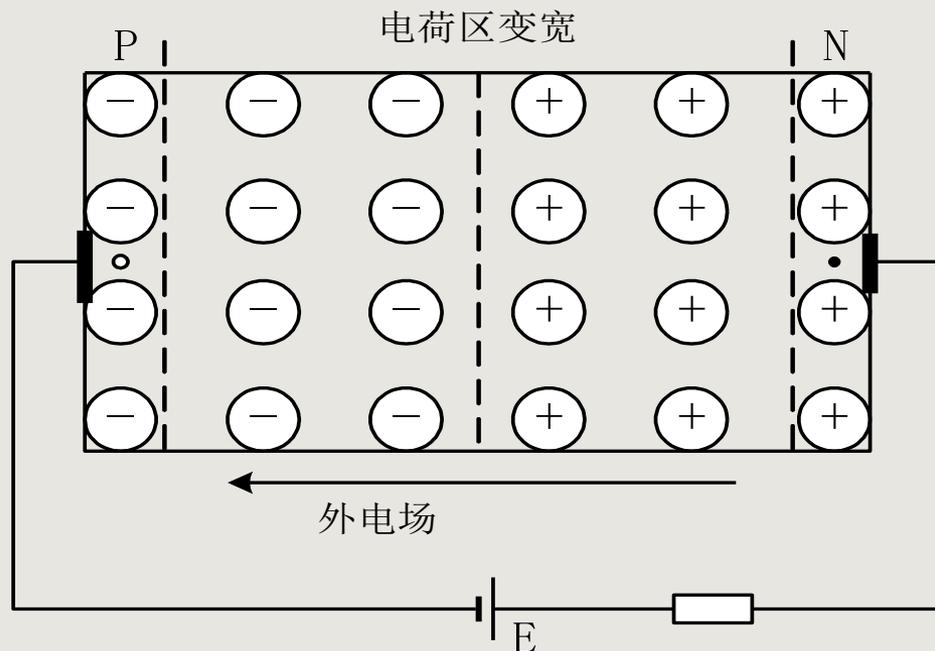


图6.1.9 反向偏置的PN结

外加电压 $N \rightarrow P$ ，这种情况称为PN结**反向偏置**。这时，**外电场增强内电场**的作用。在外电场的作用下，P区中的空穴和N区中的自由电子各自背离空间电荷区运动，使**空间电荷变宽**，从而**抑制了多子的扩散**，加强了少子的漂移，形成很小的反向电流 I_s 。



结论：**PN结具有单向导电性。**PN结**正向偏置**时，回路中有较大的正向电流，PN结呈现的电阻很小，**PN结处于导通状态**；当PN结**反向偏置**时，回路中的电流非常小，PN结呈现的电阻非常高，**PN结处于截止状态**。



6.2 半导体二极管

6.2.1 二极管的结构与特性

1. 结构

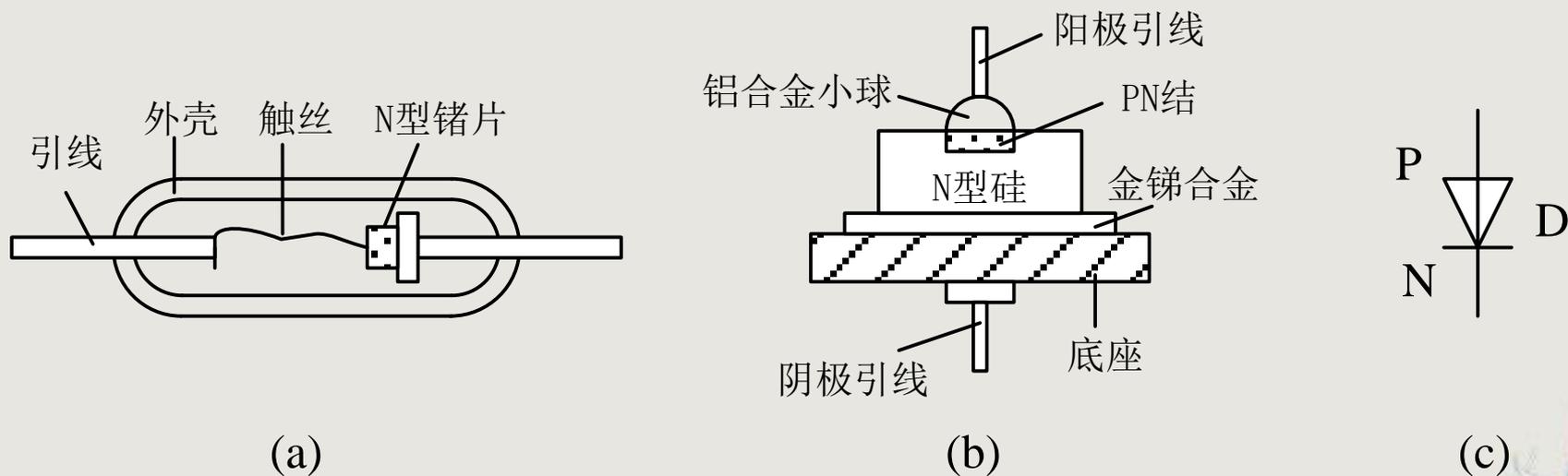


图6.2.1 半导体二极管
 (a) 点接触型 (b) 面接触型 (c) 表示符号



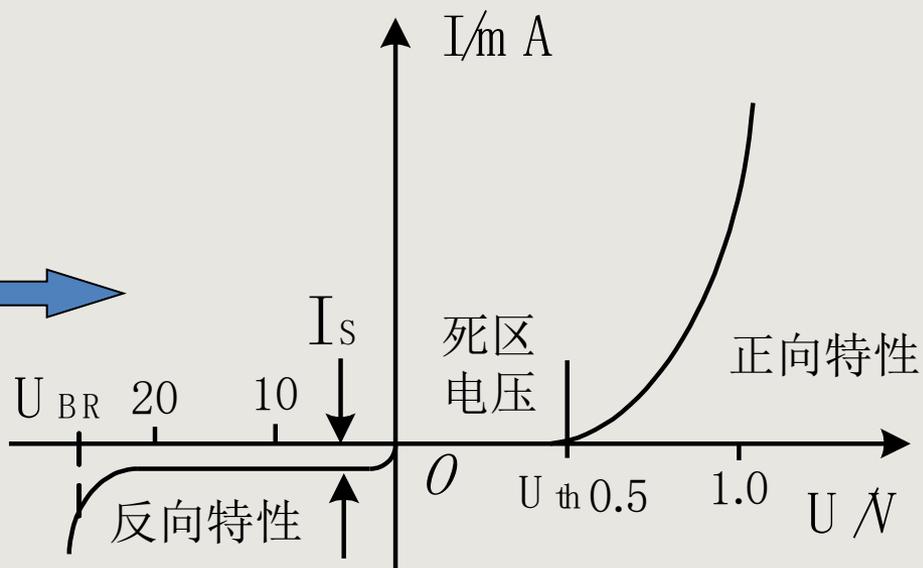
点接触型：PN结面积小，结电容小，适用于高频和小功率，用作高频检波和脉冲开关。

面接触型：PN结面积大，可通过较大的电流，电容效应明显。不能用于高频，常用作低频整流。



2. 特性

二极管的伏安特性曲线



U_{th} 称为死区电压或门坎电压。 U_{th} 的大小与材料和温度有关，通常硅管约为0.5V，锗管约为0.1V；二极管导通时的正向压降，硅管为0.6~0.8V，锗管为0.2~0.3V。

I_S 称为反向饱和电流。

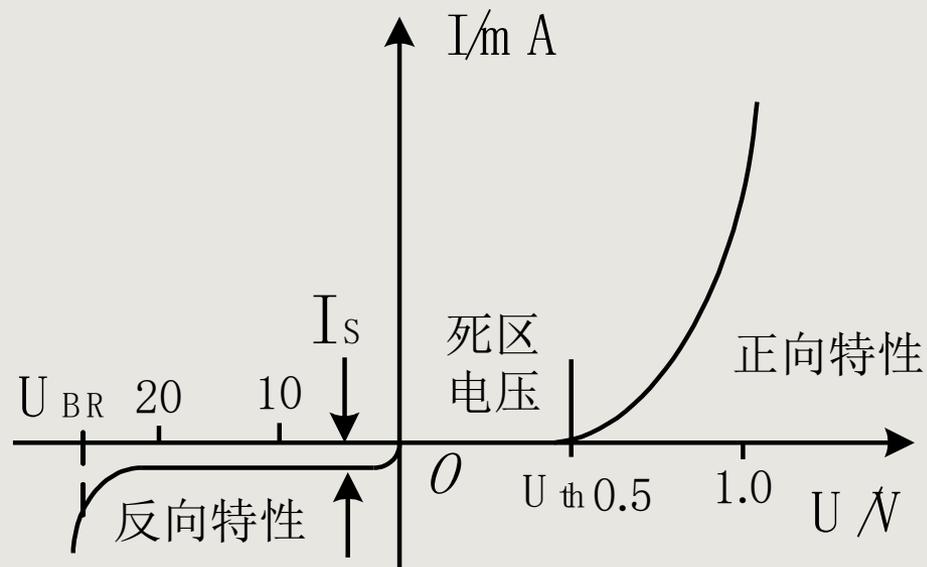
U_{BR} 称为反向击穿电压。



2. 特性

二极管方程

$$I = I_s (e^{U/U_T} - 1)$$



$U_T = kT/q$ 为温度电压当量。在常温 ($T=300K$) 下, $U_T \approx 26mV$ 。

当二极管加反向电压时, $U < 0$, 若 $|U| \gg U_T$, 则, $e^{U/U_T} \approx 0$, $I \approx I_s$ 。

当二极管加正向电压时, 若 $U \gg U_T$, 则, $e^{U/U_T} \gg 1$, $I = I_s e^{U/U_T}$

电流与电压基本上为指数关系。

6.2.2 二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_F

最大整流电流是指二极管长时间工作时，允许流过二极管的最大正向平均电流，它由PN结的结面积和散热条件决定。

2. 最大反向工作电压 U_R

它是二极管加反向电压时为防止击穿所取的安全电压，一般将反向击穿电压 U_{BR} 的一半定为最大反向工作电压 U_R 。



3. 反向电流 I_R

I_R 是指二极管加上最大反向工作电压 U_R 时的反向电流。 I_R 愈小，二极管的单向导电性就愈好。此外，由于反向电流是由少数载流子形成的，所以，温度对 I_R 的影响很大

4. 最高工作频率 f_M

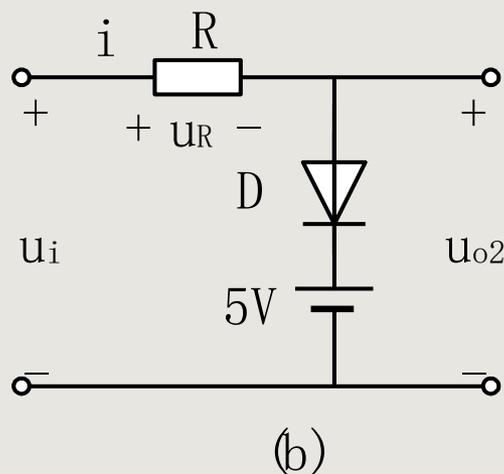
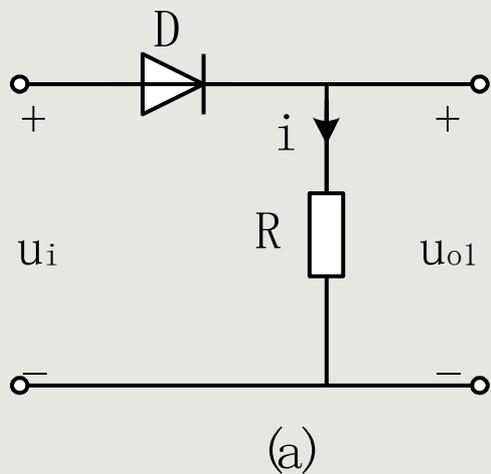
f_M 主要由PN结电容的大小决定，结电容愈大，则 f_M 就越低。若工作频率超过 f_M ，则二极管的单向导电性就变差，甚至无法使用。

二极管主要是利用其单向导电性，通常用于整流、检波、限幅、元件保护等，在数字电路中常作为开关元件。

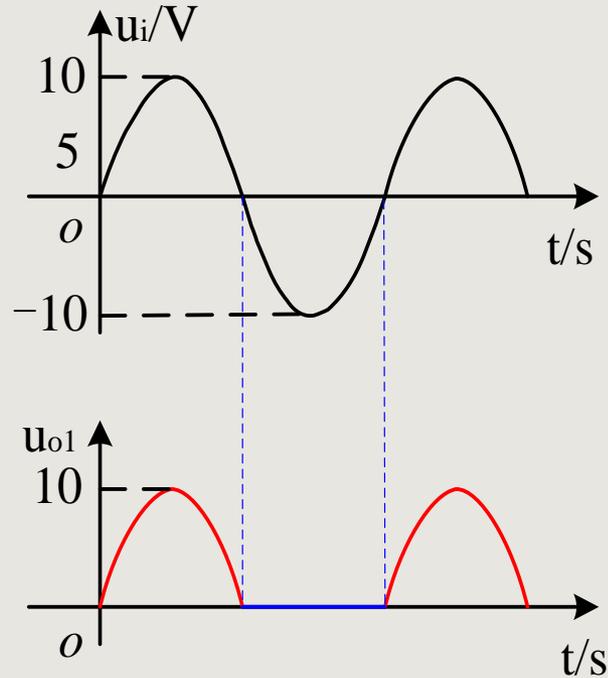
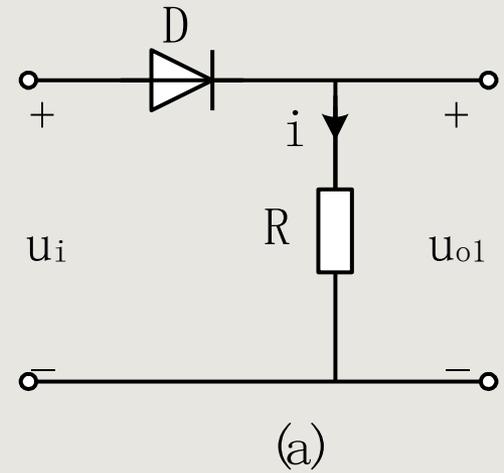


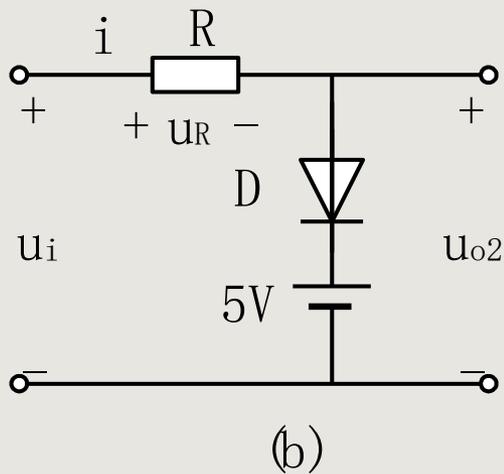
二极管一般采用理想模型或恒压源模型，两者的主要区别是：二极管正向导通时，理想二极管上的压降为0，而恒压源模型二极管上的压降为0.7V（硅管）或0.3V（锗管）。

例6.2.1 在图示电路中，输入电压 $u_i=10\sin\omega t\text{V}$ ，试画出电路的输出电压波形。设二极管为理想二极管，正向导通时压降为零，反向偏置时，反向电流为零。



对图 a 电路，由二极管的单向导电性，
 在 u_i 的正半周，D 导通， $u_{o1}=u_i$ ；
 在 u_i 的负半周，D 截止， $i=0$ ， $u_{o1}=0$ 。



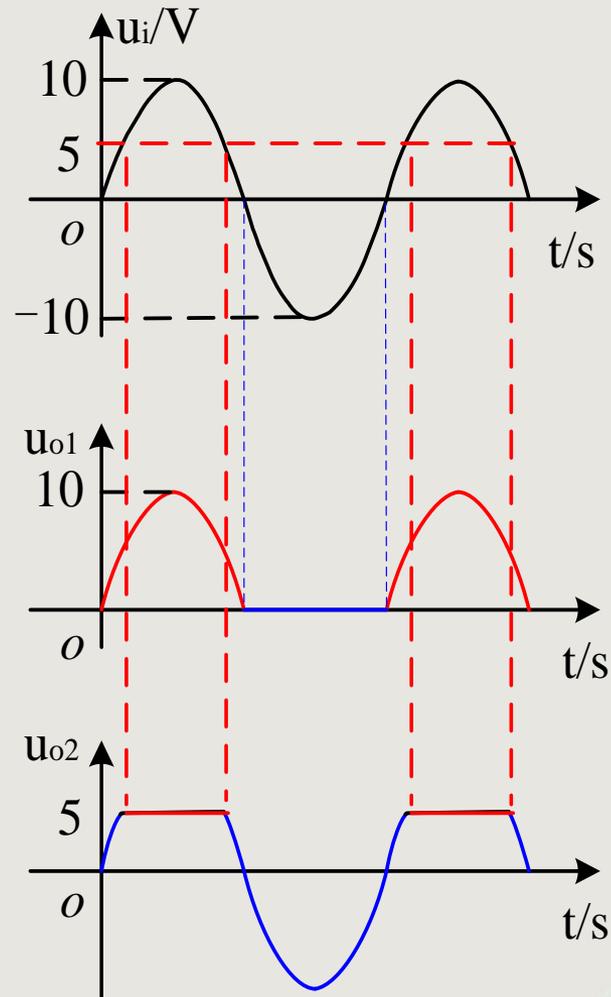


对图b所示电路:

当 $u_i > 5V$ 时, **D**导通, $u_{o2} = 5V$;

当 $u_i < 5V$ 时, **D**截止, $i = 0, u_R = 0$,

故 $u_{o2} = u_i - u_R = u_i$ 。

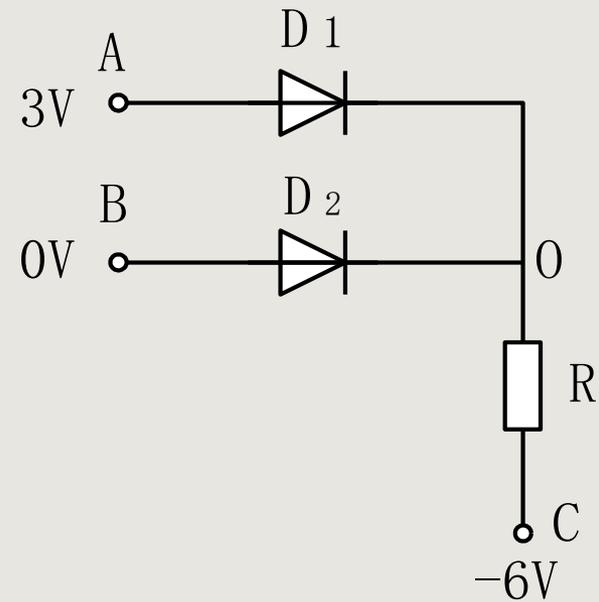


例2: 求图所示电路中O点的电位。设二极管的正向压降为0.7V。

解: $U_{AC} > U_{th}$, $U_{BC} > U_{th}$

两个二极管都能导通, 由于A点电位比B点高, 所以 D_1 优先导通, D_1 导通后,

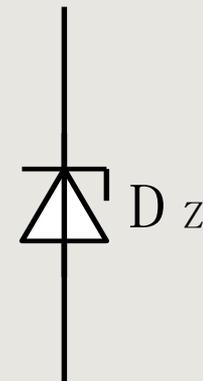
$V_0 = V_A - 0.7 = 2.3V$ 此时 D_2 上加的是反向电压, 故 D_2 截止。在这里 D_1 起钳位作用, 即把O点的电位钳住在2.3V, 而 D_2 起隔离作用, 把输入端B和输出端O隔离开来。



6.3 特殊二极管

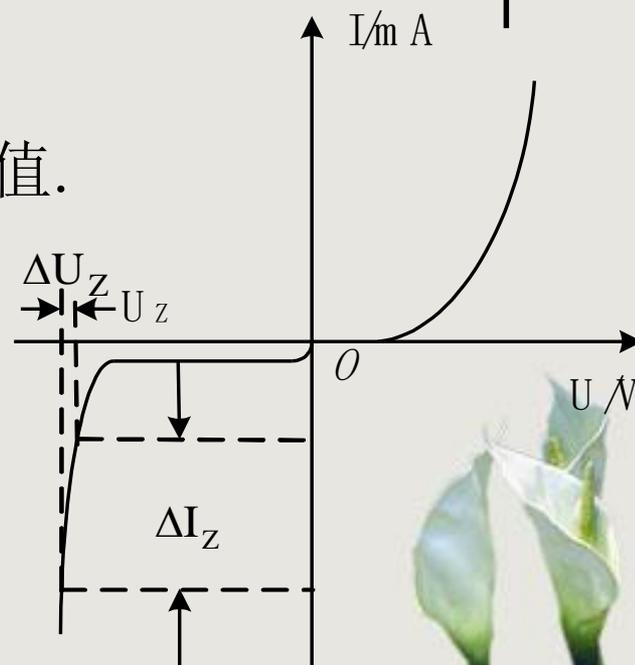
6.3.1 稳压管

稳压管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅二极管。



1. 特性曲线

稳压管工作在反向击穿区， U_Z 称为稳压值。



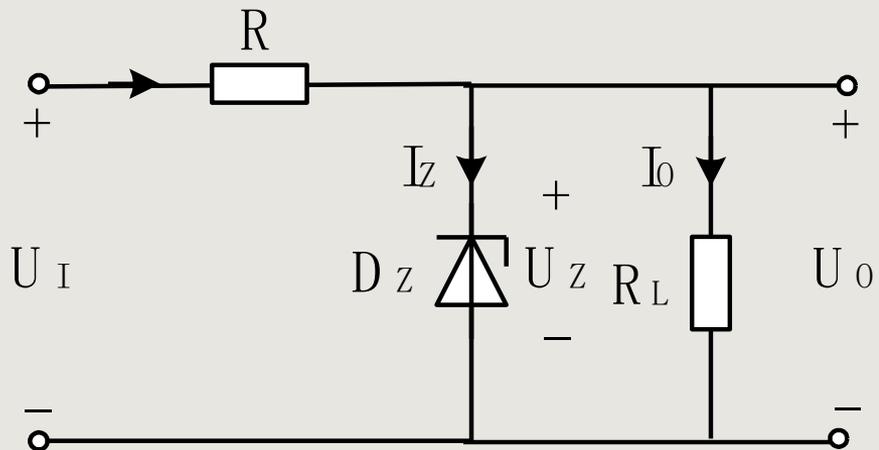
2. 主要参数

- (1) 稳压值 U_Z 稳压管在正常工作时管子两端的电压
- (2) 稳定电流 I_Z 能使稳压管正常工作的最小电流。
 $I < I_Z$ 时稳压效果较差。
- (3) 额定功耗 P_Z 稳压管允许的最大平均功率, 有的给出最大稳定电流 I_{ZM} , $P_Z = I_{ZM} U_Z$
- (4) 动态电阻 r_Z r_Z 指稳压管两端电压与电流的变化量之比, 定义式为:
- $$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$
- (5) 电压温度系数 α_u $\alpha_u = \frac{\Delta U}{\Delta T} \times 100\%$

对硅稳压管, 稳压值在4V以下的, α_u 为负值, 6V以上的, α_u 为正值, 稳压值在4V到6V之间, α_u 最小, α_u 一般不超过0.1%/°C。



3 稳压管稳压电路



稳压管和限流电阻串联即构成简单的稳压电路，限流电阻R是稳压电路不可缺少的组成元件。当输入电压有波动或负载电流变化时，电路自动通过调节R上的压降来保持输出电压基本不变。

(1) 设 R_L 不变， U_I 增大，则 $U_O=U_Z$ 也将增大， U_Z 增大，使 I_Z 增大， $I_R=I_Z+I_O$ 及 U_R 随之增大，从而使 $U_O=U_I-U_R$ 保持基本不变。此过程可表示为

$$U_I \uparrow \rightarrow U_O (U_Z) \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$$

(2) 设 U_I 不变， R_L 变小， I_O 增大， $I_R=I_O+I_Z$ 及 U_R 随之增大， $U_O=U_I-U_R=U_Z$ 相应减小，从而使 I_Z 急剧减小，因而 $I_R=I_O+I_Z$ 保持基本不变，此过程可表示为

$$R_L \downarrow \rightarrow I_O \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O (U_Z) \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow$$



限流电阻的选择?

设稳压管允许的最大工作电流为 I_{Zmax} ，最小工作电流为 I_{Zmin} ，输入电压最高为 U_{Imax} ，最低为 U_{Imin} ，负载电流最大值为 I_{Lmax} ，最小值为 I_{Lmin} ，要使稳压管能正常工作，必须满足下列条件：

当输入电压最大，负载电流最小时， I_Z 的值最大，但不应超过 I_{Zmax}

$$\longrightarrow I_Z = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin} < I_{Zmax} \longrightarrow R > \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}}$$

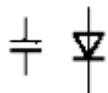
当输入电压最小，负载电流最大时， I_Z 的值最小，但不应小于 I_{Zmin}

$$\longrightarrow I_Z = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} > I_{Zmin} \longrightarrow R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}}$$

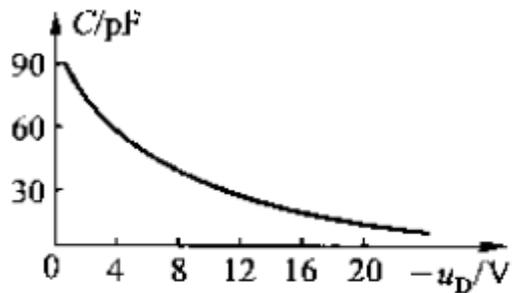
$$\frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{Zmax} + I_{Lmin}} < R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_{Zmin} + I_{Lmax}}$$

如两式不能同时满足，则说明给定条件已超出稳压管的工作范围，这时应先更换稳压管或改善稳压管的工作条件，再重新选择限流电阻 R 。

6.3.2 变容二极管



(a) 符号

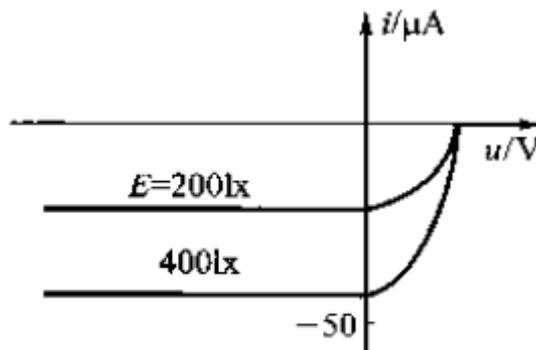


(b) C - U 特性曲线

6.3.3 光电二极管

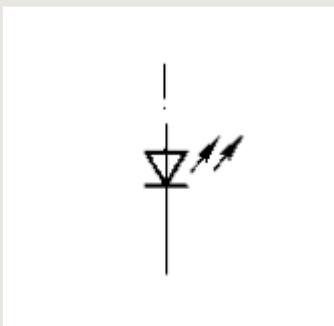


(a) 符号



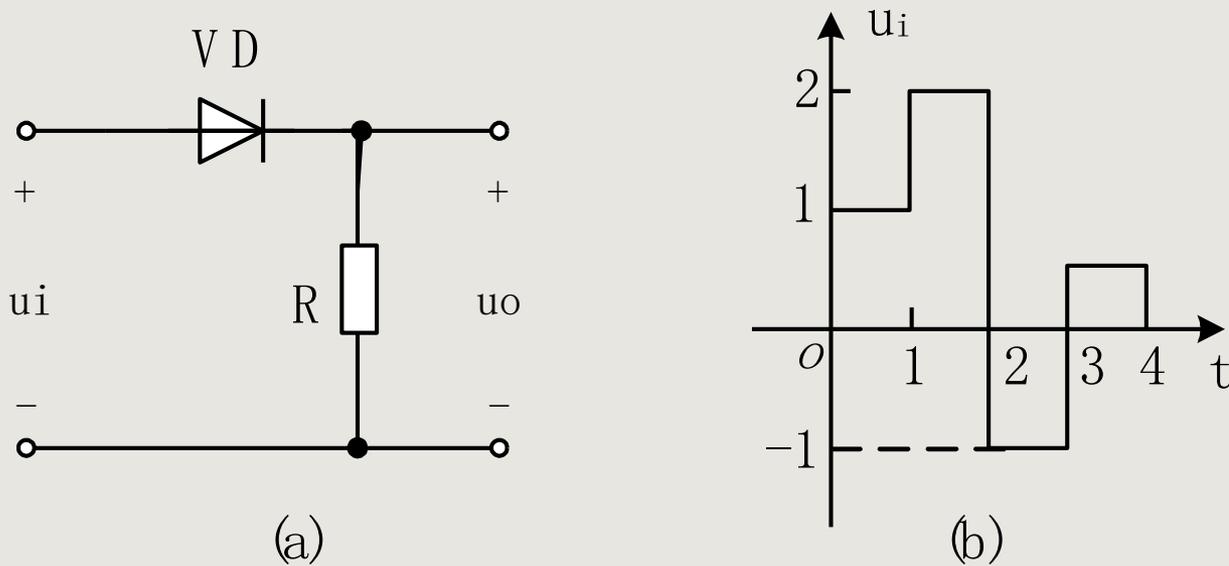
(b) 特性曲线

6.3.4 发光二极管



课堂练习:

6.7 题 图(a)所示电路中, 设二极管的正向压降为 0.6V , 输入电压的波形如图(b)所示, 试画出输出电压波形。



题6.7图

作业: 6.8; 6.9 ; 6.10





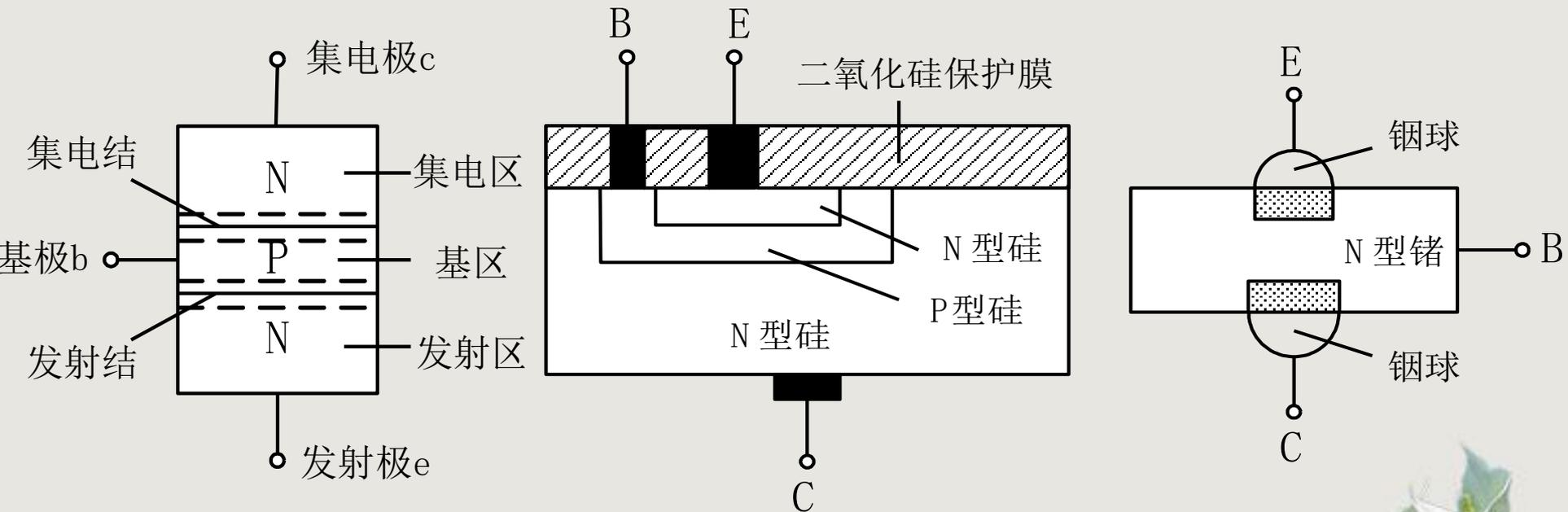
§ 6.4 半导体三极管

- 半导体三极管，也叫晶体三极管。
- 工作时，多数载流子和少数载流子都参与运行，因此，还被称为双极型晶体管（**Bipolar Junction Transistor**, 简称**BJT**）。



§ 6.4.1 三极管的结构与电流放大原理

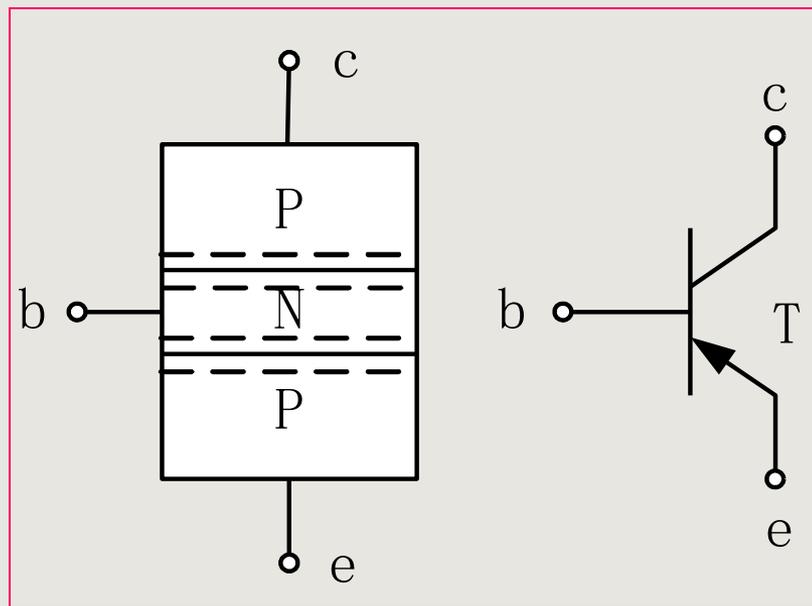
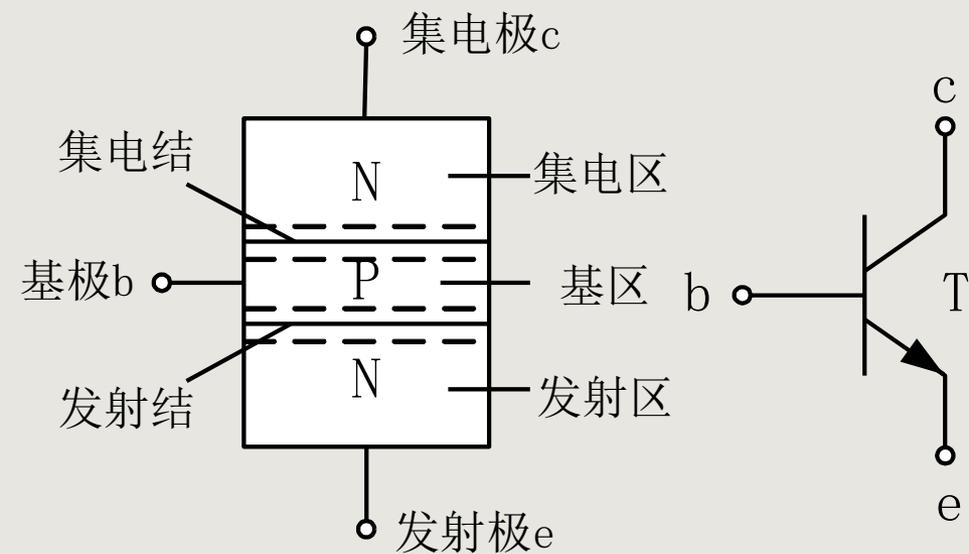
1. 三极管的结构：常见的有平面型和合金型两类。





NPN

PNP

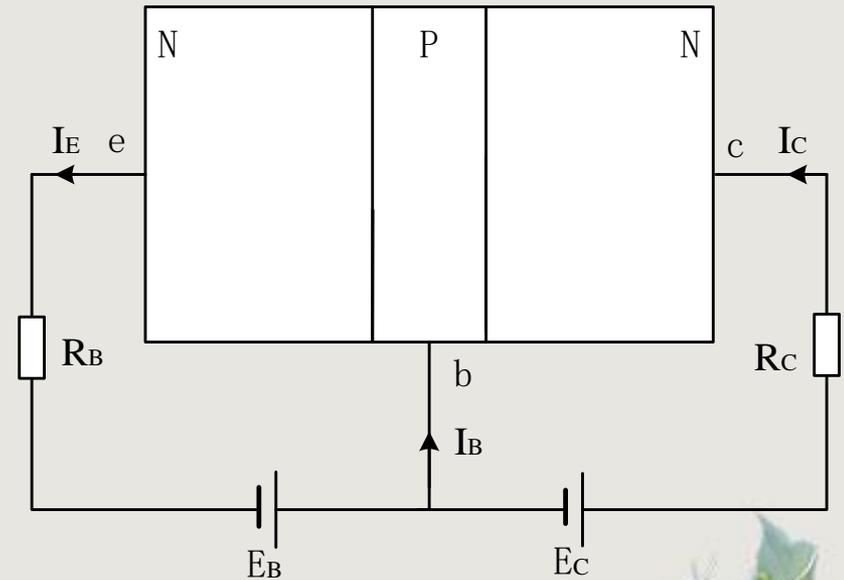


2. 三极管的电流放大原理（以NPN型为例）

➤ 三极管发射区的作用是向基区注入载流子；基区是传递和控制载流子的，而集电区是收集载流子的。

➤ 首先，发射区要向基区注入载流子——电子，因此要在发射结加正向电压 E_B 。

➤ 其次，要保证注入到基区的电子经过基区后传输到集电区，因此要在集电结上加反向电压 E_C 。

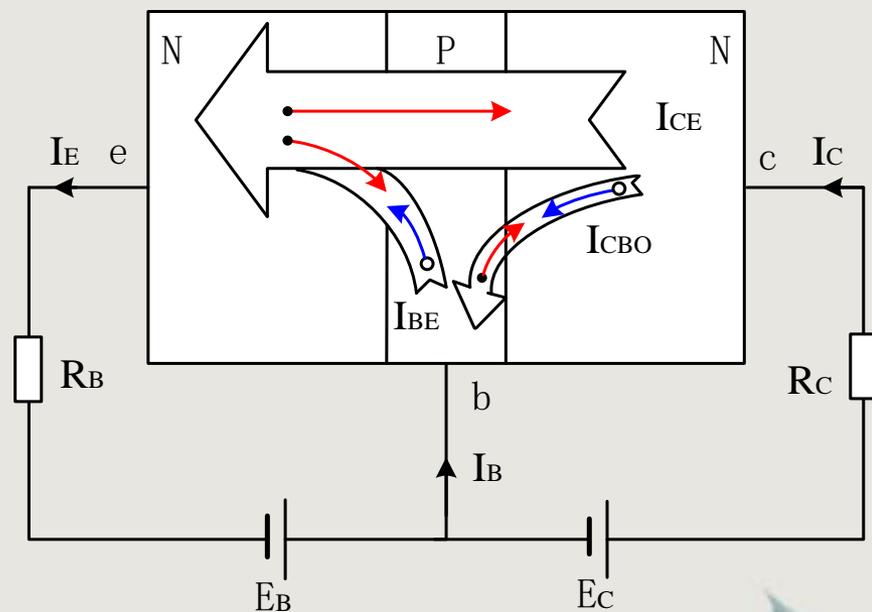


2. 三极管的电流放大原理（以NPN型为例）

在这两个外加条件下，三极管内载流子的传输发生如下过程

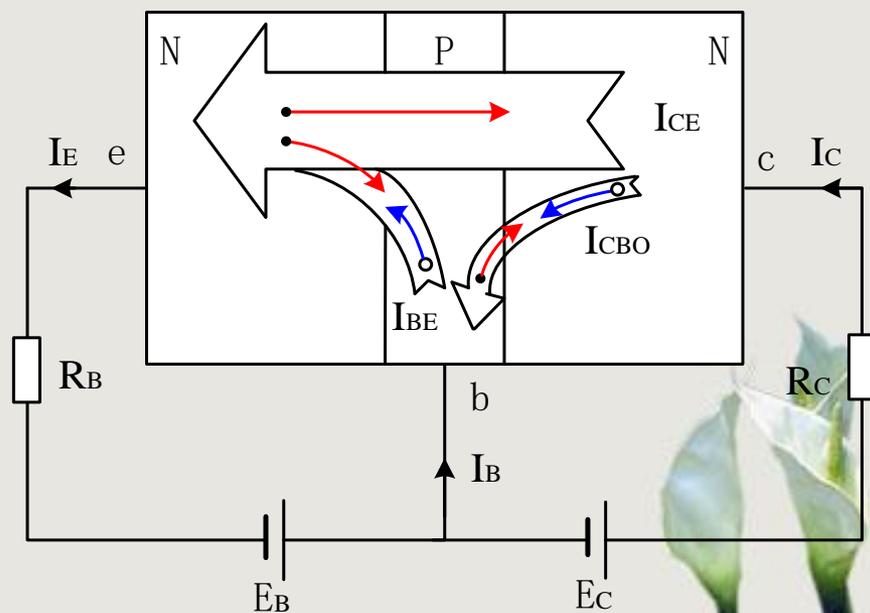
(1) 发射区向基区注入电子

发射结正向偏置，发射区的多数载流子—电子扩散到基区，并不断从电源补充进电子，形成发射极电流 I_E ，基区的多数载流子—空穴，也要向发射区扩散，但由于基区的空穴浓度比发射区的电子浓度小得多，空穴电流很小，可以忽略。



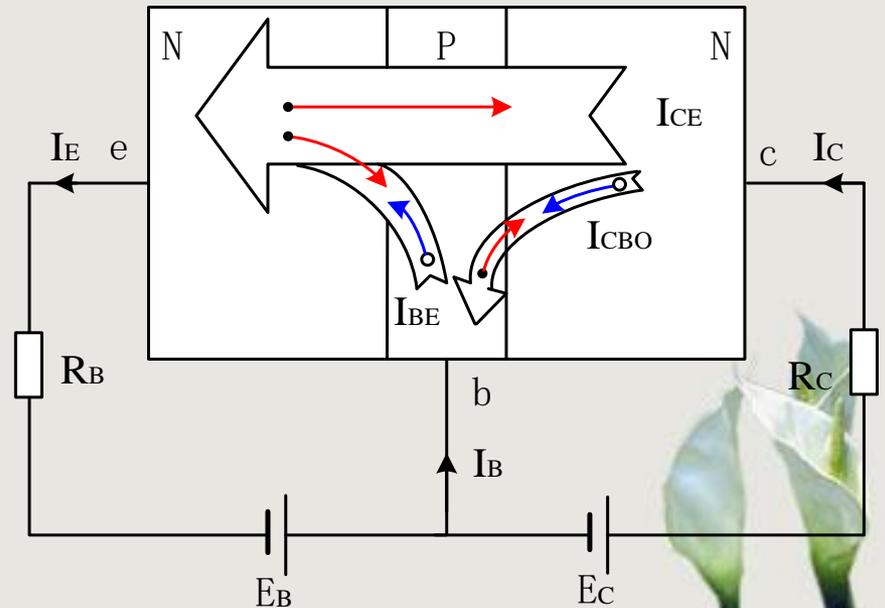
(2) 电子在基区的扩散和复合

发射区扩散到基区的电子，与基区内的空穴复合，形成电流 I_{BE} 。复合掉的空穴由电源补充，形成基极电流 I_B 的主流。基区很薄且掺杂浓度很小，从发射区扩散过来的电子绝大部分到达集电结，并向集电区扩散。



(3) 集电区收集扩散过来的电子

集电结所加的是反向电压，它阻止集电区的多数载流子——电子向基区扩散，但对从发射区扩散到基区的电子有很强的吸引力，使之很快漂移过集电结，形成电流 I_{CE} 。另外，由于集电结加反向电压，基区和集电区中的少数载流子产生漂移运动，形成电流 I_{CBO} ，称为反向饱和电流。





载流子电流和电路电流的关系

$$I_E = I_{CE} + I_{BE}$$

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

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

定义三极管的电流放大系数

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

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

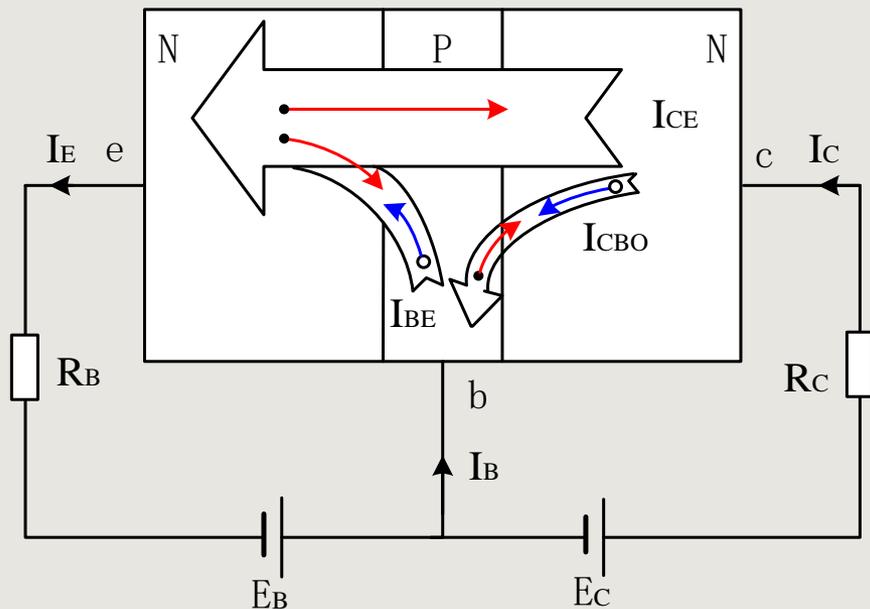
$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = (1 + \bar{\beta}) I_B + I_{CEO}$$

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

← 穿透电流

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

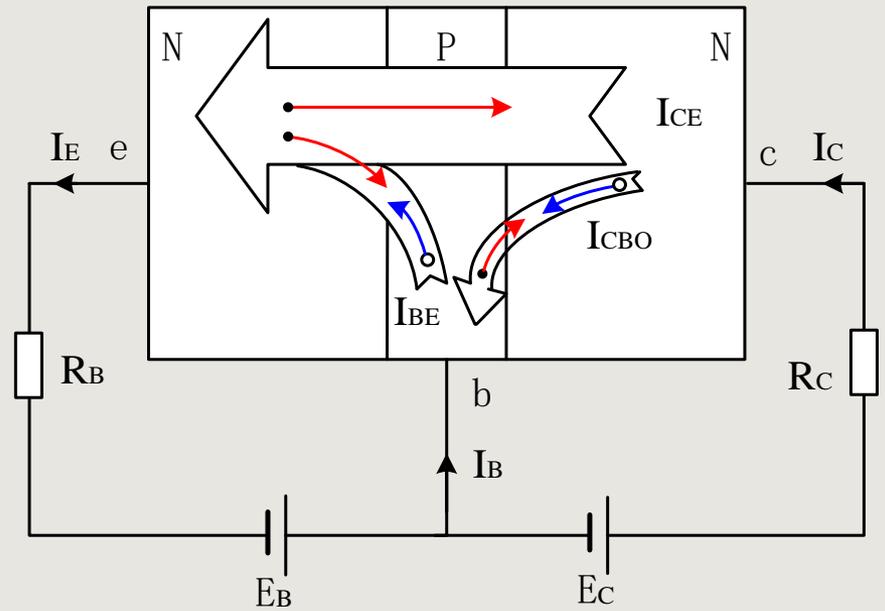
$$I_E = (1 + \bar{\beta}) I_B$$



交流电流放大系数

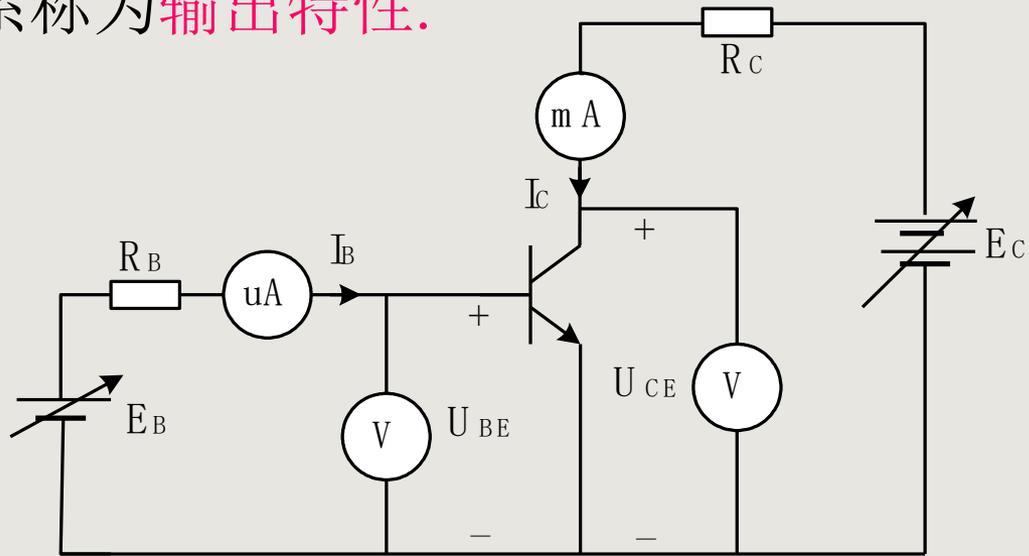
$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

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



§ 6.4.2 三极管的特性曲线

- 三极管的特性用各极电流与极间电压之间的关系来表示.
- U_{BE} 与 I_B 的关系称为**输入特性**.
- U_{CE} 和 I_C 的关系称为**输出特性**.

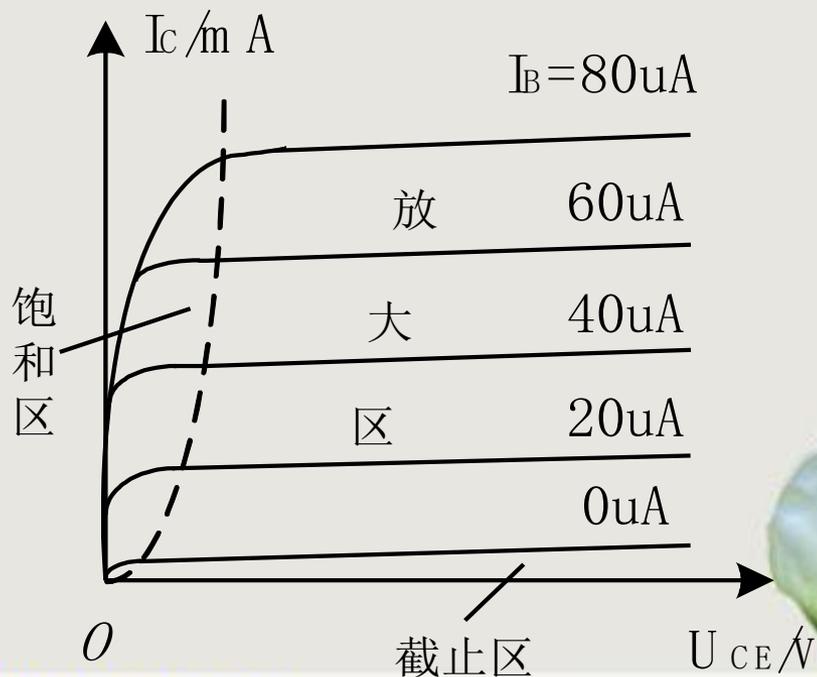
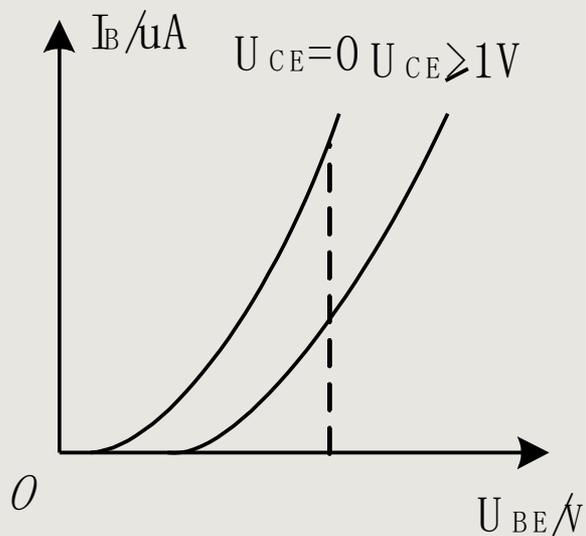
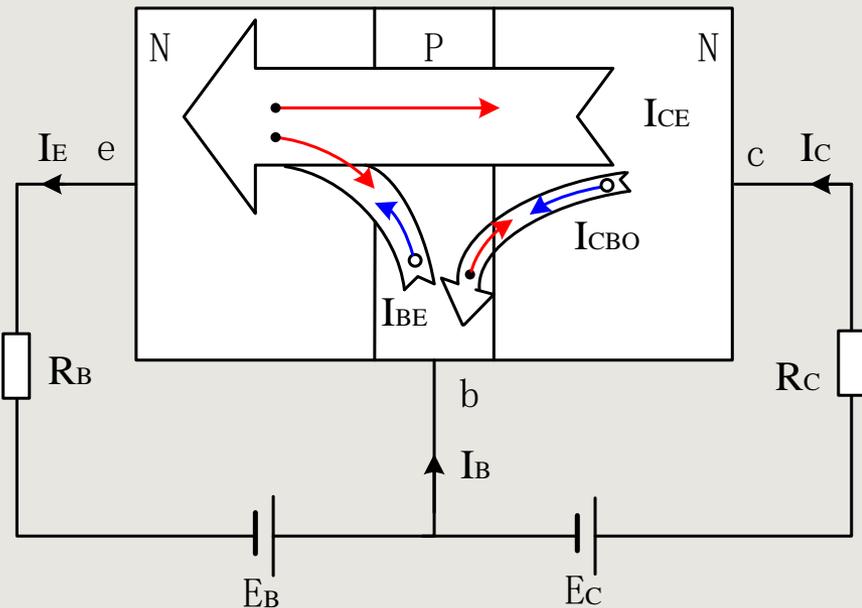


晶体管特性曲线的测试电路

§ 6.4.2 三极管的特性曲线

1. 输入特性 $I_B = f(U_{BE}) |_{U_{CE} = \text{常数}}$

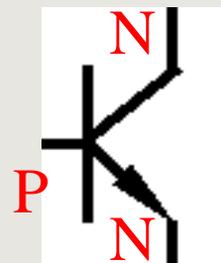
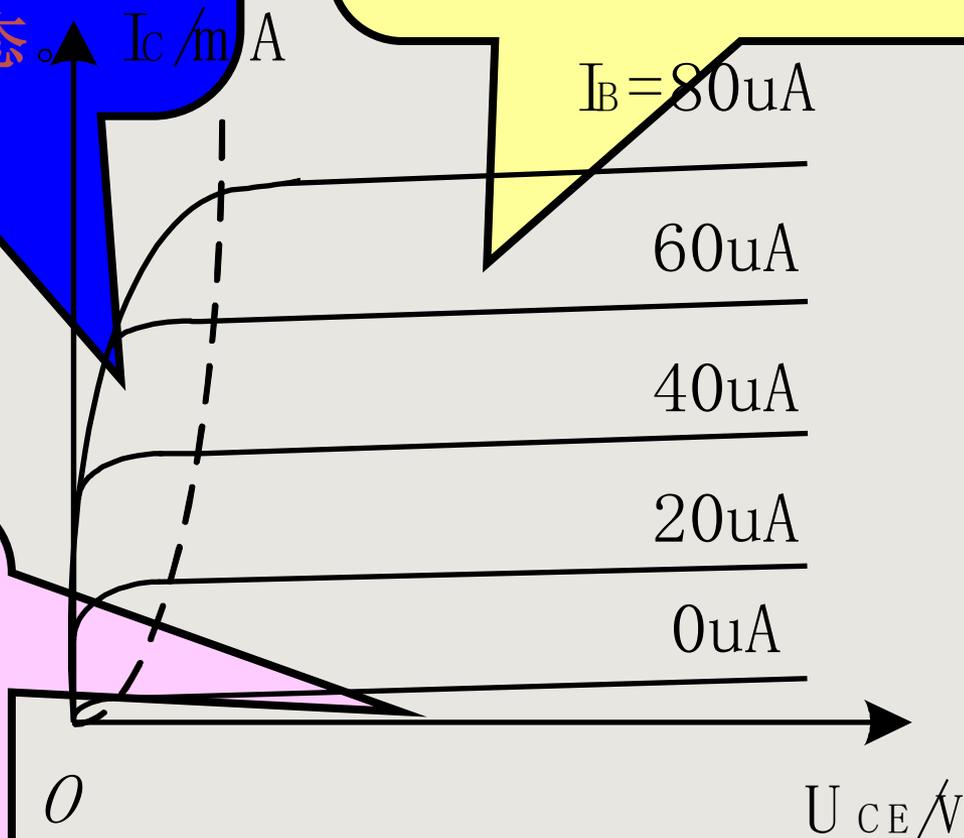
2. 输出特性 $I_C = f(U_{CE}) |_{I_B = \text{常数}}$



U_{CE} 较小时，集电区收集电子的能力较弱， I_C 不能随 I_B 同比例增加， $I_C < I_B$ ，此区域称为**饱和区**。此时三极管处于**饱和状态**。

当 U_{CE} 大于 1V 时， I_C 只与 I_B 有关，与 U_{CE} 基本无关。 $I_C \approx \beta I_B$ 。此区域称为**线性放大区**。此时三极管处于**放大状态**。

$I_B = 0, I_C = I_{CEO} > I_B$ ，发射结截止，此区域称为**截止区**。此时三极管处于**截止状态**。



§ 6.4.3 三极管的微变等效电路

- 晶体管是一个非线性元件.
- 若输入信号幅度变化很小，不在输出特性的饱和区和截至区，晶体管电压、电流关系基本上是线性的.
- 利用一个线性电路替代晶体管，这个线性电路即为晶体管的微变等效电路.



§ 6.4.3 三极管的微变等效电路

为了便于分析，规定：

- **直流**电压用大写字母U和大写下标表示，如 U_{BE} 表示基极和发射极电压的直流分量或静态值；
- **纯交流**电压用小写字母u和小写下标表示，如 u_{be} ；
- 总电压或电压**瞬时值**用小写字母u和大写下标表示，如 u_{BE} ；
- 纯交流电压的**有效值**用大写字母U和小写下标表示，如 U_{be} 。



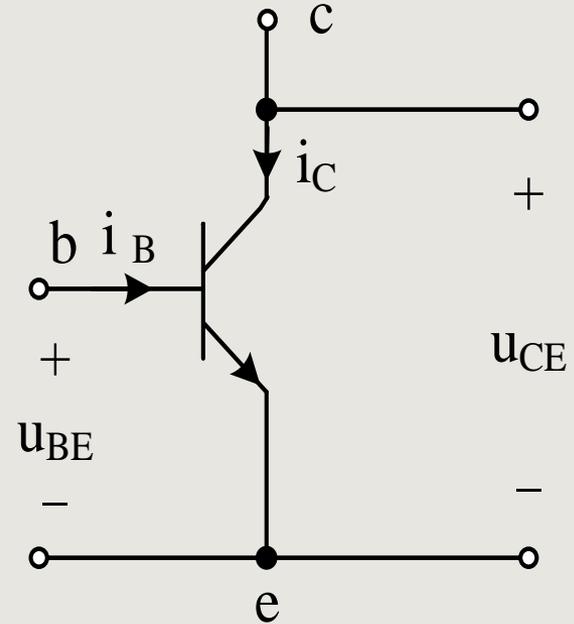
§ 6.4.3 三极管的微变等效电路

$$i_C = I_C + i_c$$

$$u_{BE} = U_{BE} + u_{be}$$

$$u_{CE} = U_{CE} + u_{ce}$$

$$i_B = I_B + i_b$$



对三极管而言，若 u_{be} 与 U_{BE} 相比，是一时变的小信号电压，则 i_b 、 i_c 和 u_{ce} 也是时变的小信号电流或电压。



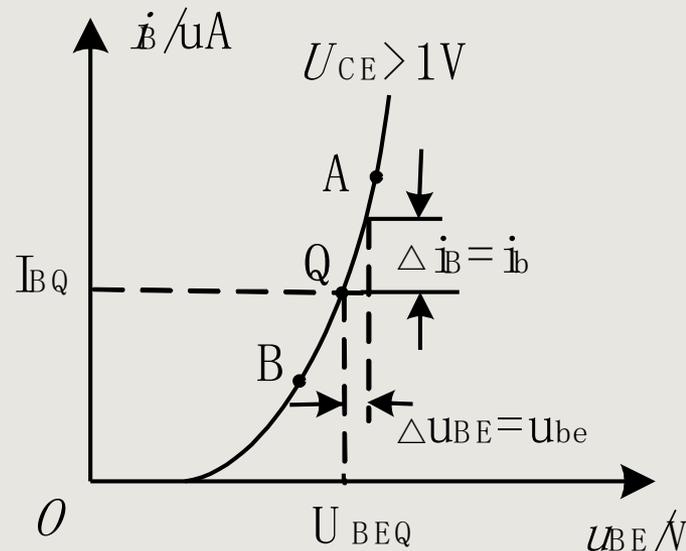
从输入特性观察:

在小信号电压作用下, 工作点在AB之间变化。

Q 是 $u_{be}=0$ 时三极管的工作点, 称**静态工作点**。

在A和B之间, Δi_B 与 Δu_{BE} 成正比, $\left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE}}$ 是一个定值 (曲线斜率的倒数), 只与 Q 点的位置有关

$$r_{be} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE}}$$



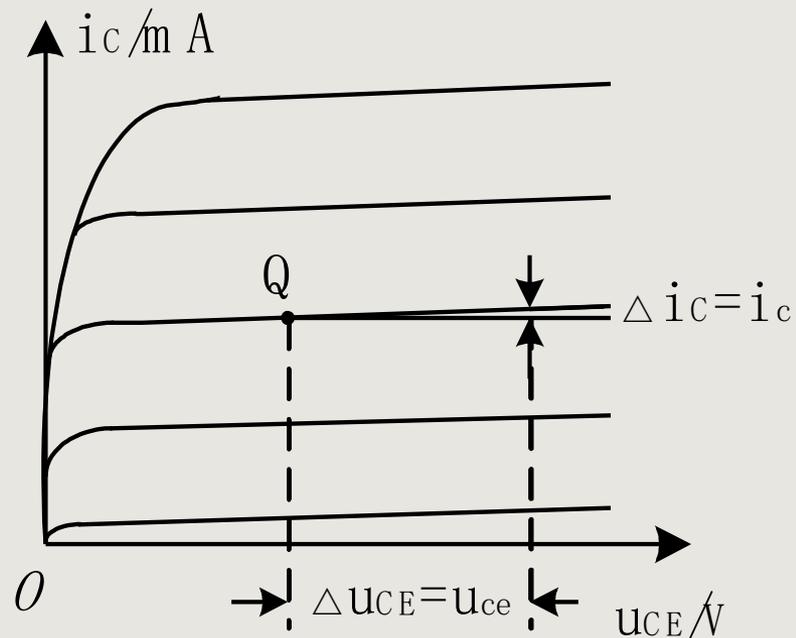
u_{CE} 变化时输入特性曲线基本重合, 即 i_B 一定时, u_{BE} 不随 u_{CE} 变化而变化

$$\mu_r = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}} \right|_{i_B} \approx 0$$

从输出特性观察:

由三极管交流电流放大系数的定义

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



线性放大区，输出特性曲线比较平坦，即 i_B 一定时， i_C 基本不随 u_{CE} 变化而变化

$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} \right|_{i_B} \approx \infty$$

$r_{bc}, \mu_r, \beta, r_{ce}$ 全面反映了三极管特性曲线（在线性放大区）的特点。

以 i_B 和 u_{CE} 为自变量, u_{BE} 和 i_C 的全微分可表示为

$$du_{BE}(i_B, u_{CE}) = \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_B} \right|_{u_{CE}} di_B + \left. \frac{\partial u_{BE}}{\partial u_{CE}} \right|_{i_B} du_{CE}$$

$$di_C(i_B, u_{CE}) = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{u_{CE}} di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{i_B} du_{CE}$$

用微量表示

$$\Delta u_{BE} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE}} \Delta i_B + \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}} \right|_{i_B} \Delta u_{CE}$$

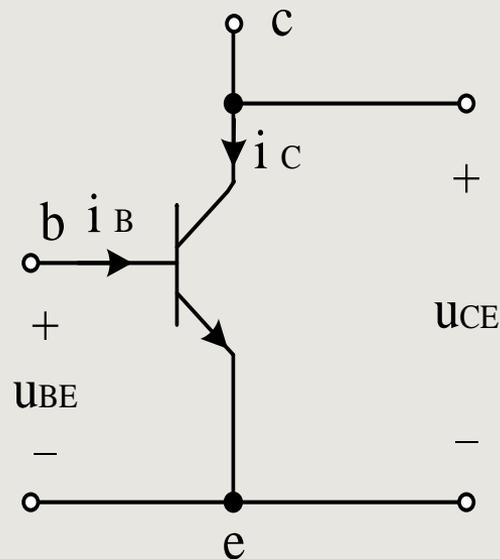
$$\Delta i_C = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE}} \Delta i_B + \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \right|_{i_B} \Delta u_{CE}$$

$$r_{be} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{u_{CE}}$$

$$\mu_r = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{CE}} \right|_{i_B} \approx 0$$

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

$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} \right|_{i_B} \approx \infty$$

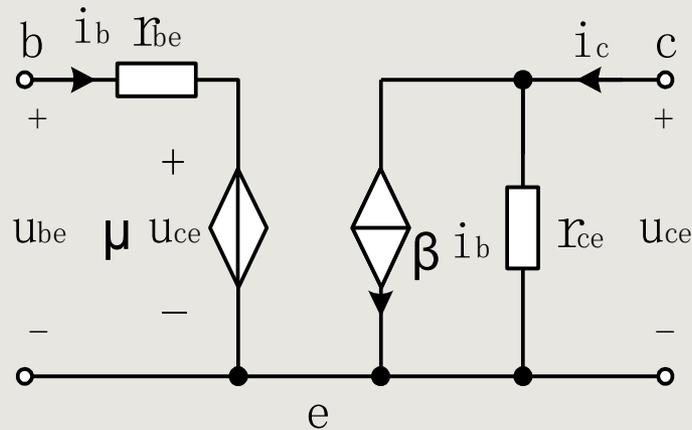


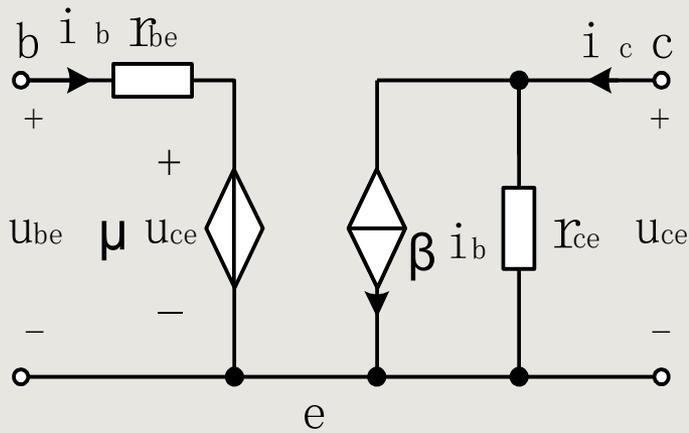
设各变量是在小信号作用下产生的，则

$$u_{be} = r_{be} i_b + \mu_r u_{ce}$$

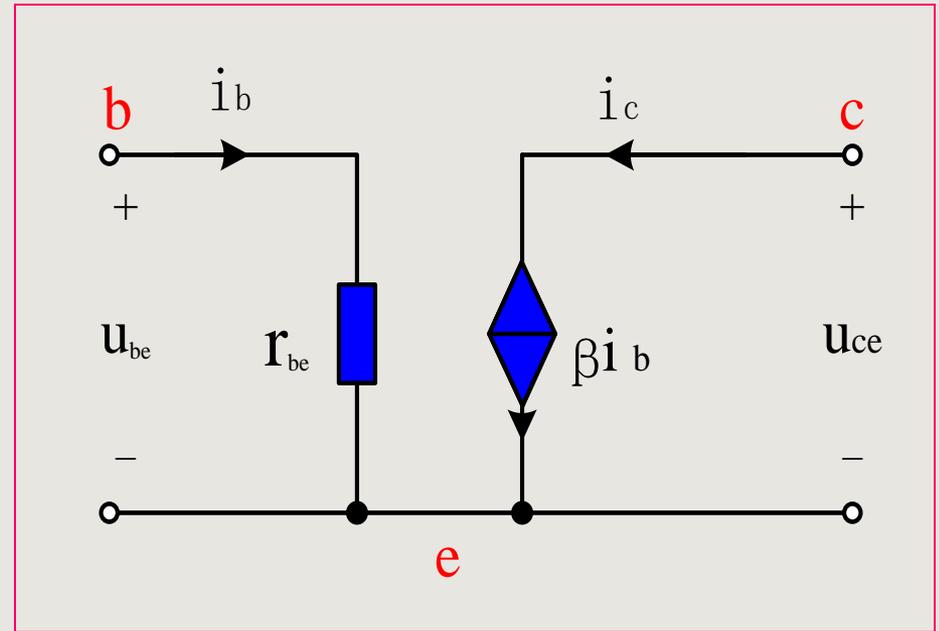
$$i_c = \beta i_b + \frac{1}{r_{ce}} u_{ce}$$

等效电路





常用的简化等效电路



r_{be} 称为三极管的输入电阻。对低频小功率三极管

$$r_{be} = 300 + \beta \frac{26(mV)}{I_C(mA)}$$

适用范围是 $0.1mA < I_C < 5mA$



§ 6.4.4 三极管的主要参数

1. 电流放大系数

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} = \frac{I_C}{I_B} = \bar{\beta}$$

2. 极间反向饱和电流 I_{CBO} 、 I_{CEO}

I_{CBO} 为发射极开路，集电结加反向电压时的电流； I_{CEO} 为基极开路，集电结加反向电压、发射结加正向电压时的集电极电流。

3. 特征频率 f_T ： β 下降到1时所对应的频率。

4. 集电极最大允许电流 I_{CM}

集电极电流 I_C 超过一定值时，三极管的 β 值就要下降， β 下降到正常值的2/3时的集电极电流称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。

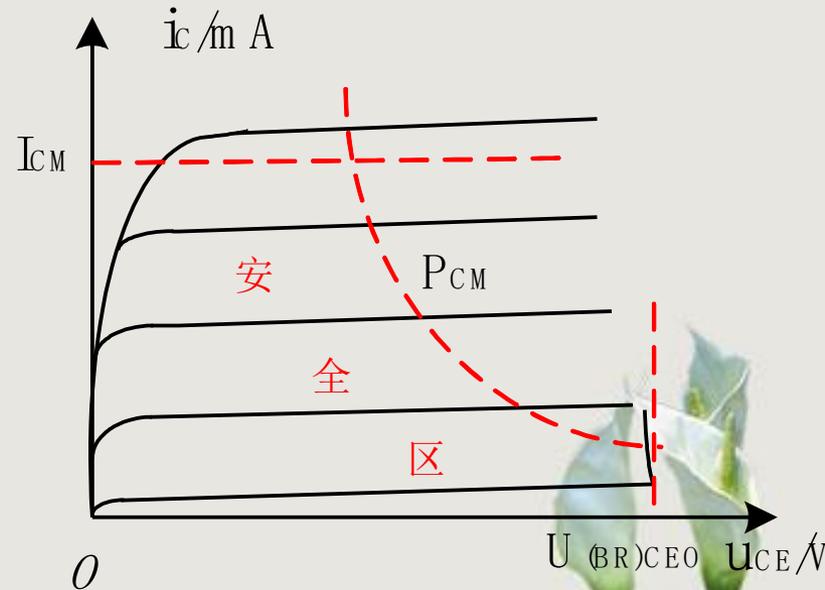
§ 6.4.4 三极管的主要参数

5. 集电极—发射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

基极开路时，加在集电极和发射极之间的最大允许电压称为反向击穿电压。

6. 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 称为三极管的极限参数，这三者共同确定了三极管的**安全工作区**。



半导体三极管的型号

国家标准对半导体器件型号的命名举例如下：

3DG110B——用字母表示同一型号中的不同规格
用数字表示同种器件型号的序号
用字母表示器件的种类
用字母表示材料
三极管

第二位： **A** 锗PNP管、**B** 锗NPN管、
C 硅PNP管、**D** 硅NPN管

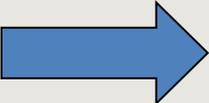
第三位： **X** 低频小功率管、**D** 低频大功率管、
G 高频小功率管、**A** 高频大功率管、**K** 开关管



例6.4.1 在放大电路中正常工作的三极管，测得其管脚的对地电位为 $U_1=4V$ ， $U_2=3.4V$ ， $U_3=9V$ ，试确定三极管的类型及其三个电极。

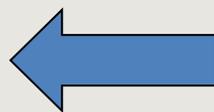
解： 由于 $U_1-U_2=0.6V$ ，为硅二极管的正向压降，故可确定三极管是硅管，且1、2之间是发射结；  3为集电极

三极管正常工作的条件是发射结正偏，集电结反偏

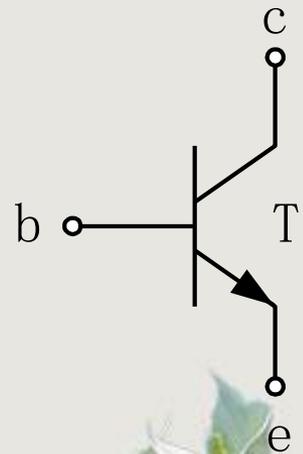
集电结反偏  集电区为N型  NPN型硅管

U_3 最大

1是基极
2是发射极



发射结正偏
 $U_{BE}>0$



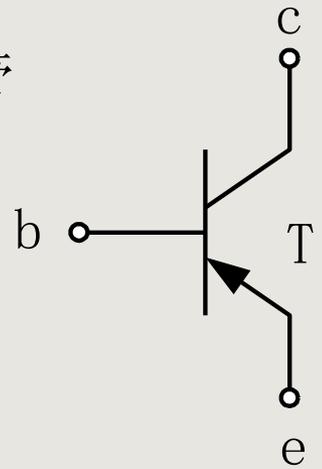
若 $U_1=10.3\text{V}$, $U_2=10\text{V}$, $U_3=3\text{V}$.

$U_1-U_2=0.3\text{V}$, 三极管是锗管, 1、2之间是发射结, 3为集电极。

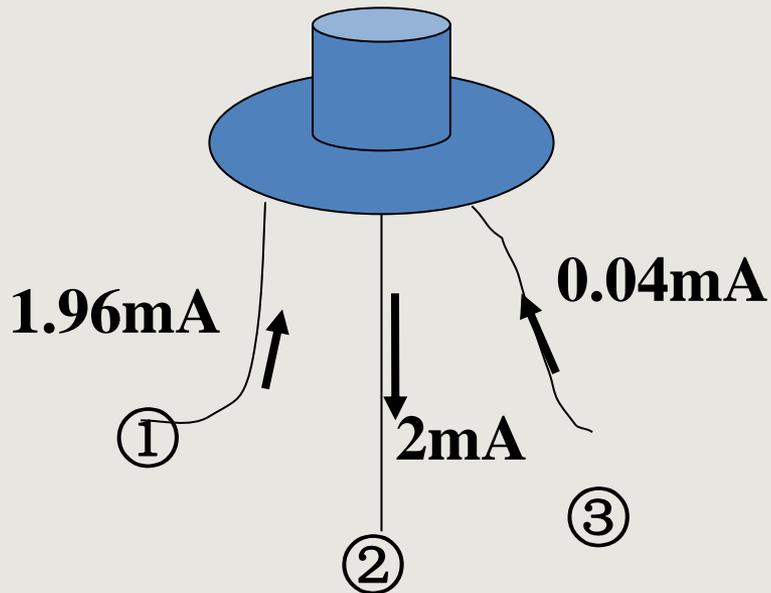
集电结反偏 \longrightarrow 集电区为P型 \longrightarrow PNP型锗管
 U_3 最小

1是发射极
2是基极

发射结正偏
 $U_{EB}>0$



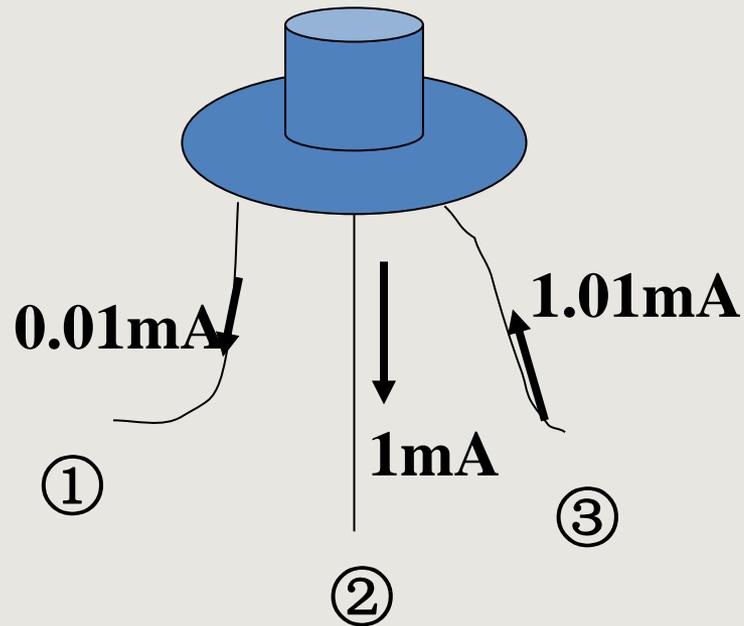
例6.4.2: 已知三极管放大时电流, 判断三极管类型并求 β



(a)

(a) NPN

$$\beta = I_C / I_B = 1.96 / 0.04 = 49$$



(b)

(b) PNP

$$\beta = I_C / I_B = 1 / 0.01 = 100$$



青島理工大學

作业: 6.14; 6.16

