

# 第1章 半导体基础知识

1.1 半导体基础知识

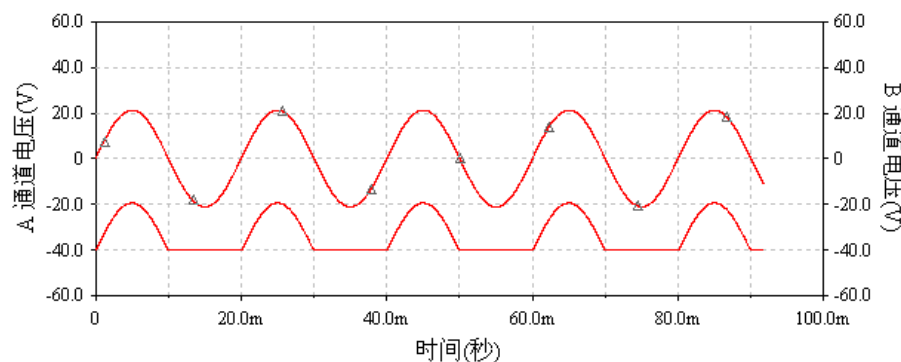
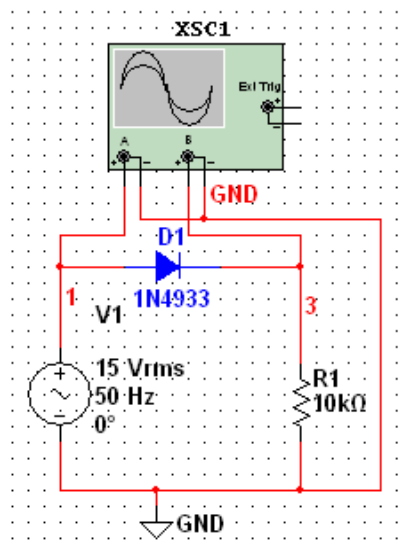
1.2 半导体二极管

1.3 稳压二极管

1.4 晶体三极管

## 【引例】

目前，各种电子产品在日常生活中广泛应用，我们可知道，电子产品的最基础的核心器件是半导体器件？半导体器件是怎么工作的？



学完本章内容就可以回答这个问题。

# 1.1 半导体基础知识

---

## 1.1.1 本征半导体

---

### 1. 半导体

自然界的物质按其导电能力分为三种，即

**导体：**很容易导电的物质。如金属。

**绝缘体：**几乎不导电的物质。如橡胶、塑料和石英。

**半导体：**导电能力处于导体和绝缘体之间的物质。  
如锗、硅、砷化镓和一些硫化物、氧化物等。

## 2. 半导体的导电特点

(1) 当受外界热激发时，其导电能力明显增强。

人们利用这一特点制成了热敏元件，用于检测温度的变化。

(2) 当受外界光的作用时，其导电能力明显增强。

人们利用这一特点制成了光敏元件，应用于光的测量、光电转换、光控电路中。

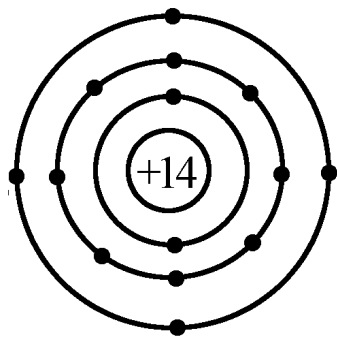
(3) 往纯净的半导体中掺入某些微量杂质，其导电能力就可增加几十万至几百万倍。

人们利用这一特点制成了半导体二极管，稳压管、晶体管和场效应管等。

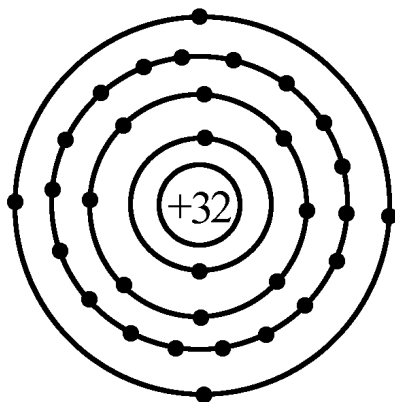
### 3.本征半导体的晶体结构

**晶体：**通过一定的工艺处理，将半导体制成晶体。

**本征半导体：**完全纯净的、结构完整的半导体晶体。



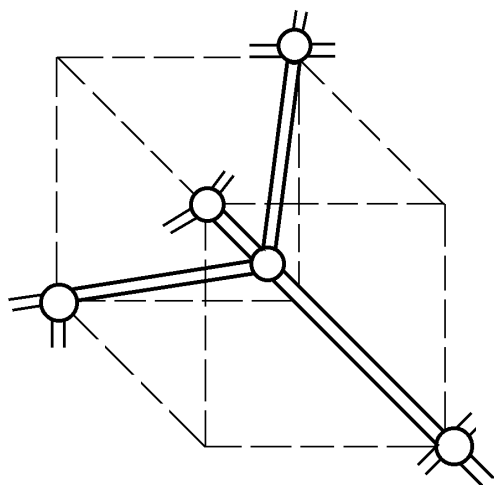
(a) 硅原子结构



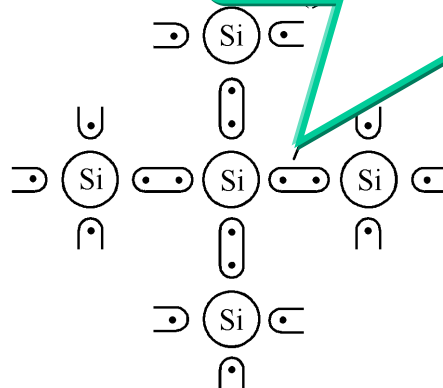
(b) 锗原子结构

硅和锗的最外层有4个价电子,称为四价元素。

**共价键:**在硅和锗晶体中，原子按四角形系统组成晶体点阵，每个原子都处在正四面体的中心，而四个其它原子位于四面体的顶点，每个原子与其相邻的原子之间形成共价键结构，共用一对价电子。



立体结构

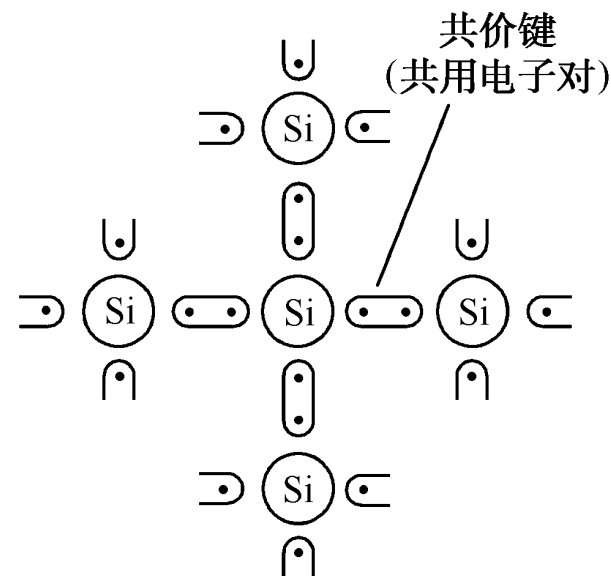


共价键的平面表示

两相邻原子的价电子组成一个电子对，它们将两个相邻原子结合在一起，构成共价键结构。

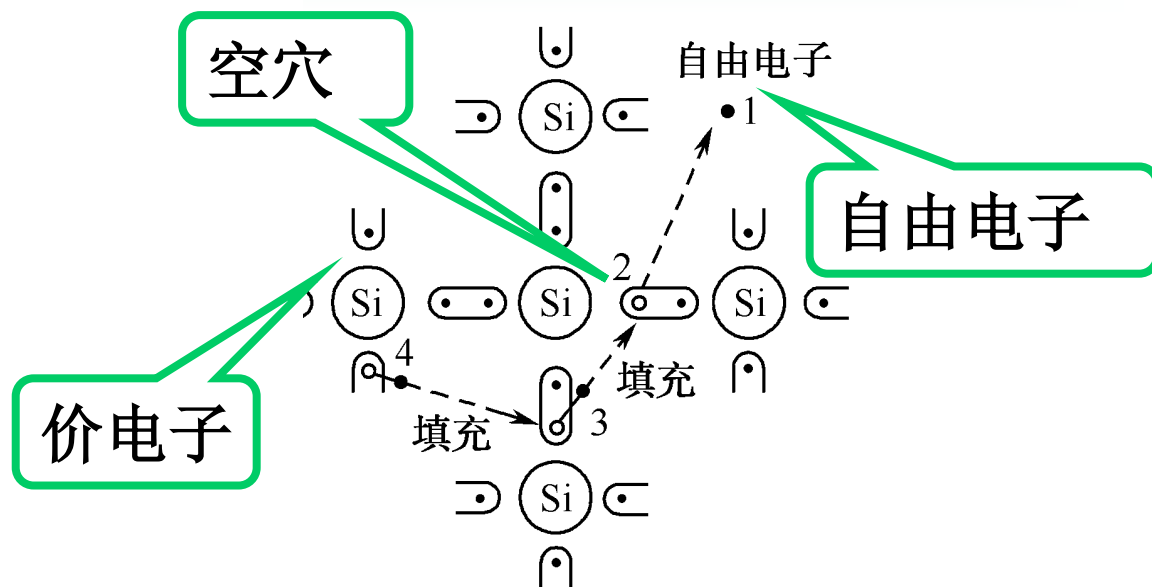
## 4. 本征半导体中的两种载流子

形成共价键后，  
每个原子的最外层电  
子是八个，构成稳定  
结构。



共价键中的两个价电子被紧紧束缚在共价键中，常温下这些价电子很难脱离共价键的束缚，因此本征半导体中的自由电子很少，所以本征半导体的导电能力很弱。

当环境温度升高时，使一些价电子获得足够的能量脱离共价键的束缚，成为**自由电子**，同时共价键上留下一个空位，称为**空穴**。



出现空穴后，原子带正电，则吸引邻近的价电子来填补这个空穴，这样继续下去，相当于空穴在运动，而空穴的运动相当于正电荷的移动，因此可以认为空穴是载流子。



## 小结

本征半导体中存在数量相等的两种载流子，即自由电子和空穴。

本征半导体的导电能力取决于载流子的浓度。

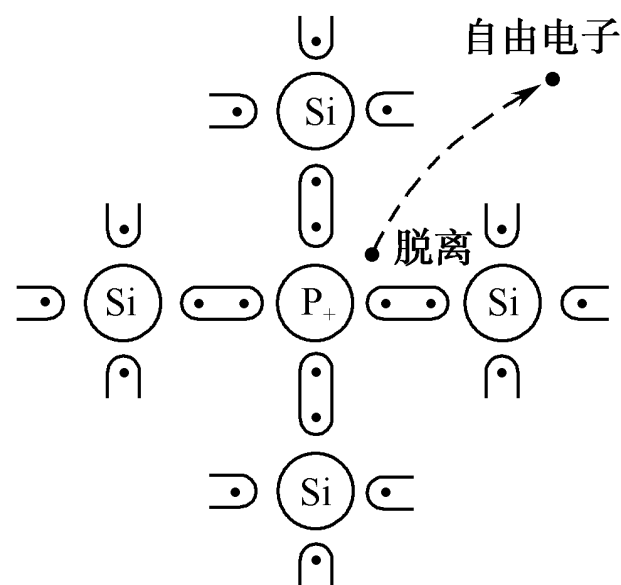
温度越高，载流子的浓度越高，本征半导体的导电能力越强，温度和光照是影响半导体性能的一个重要的外部因素。

## 1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入其他的微量元素，就会使半导体的导电性能有显著变化。

### 1. N型半导体

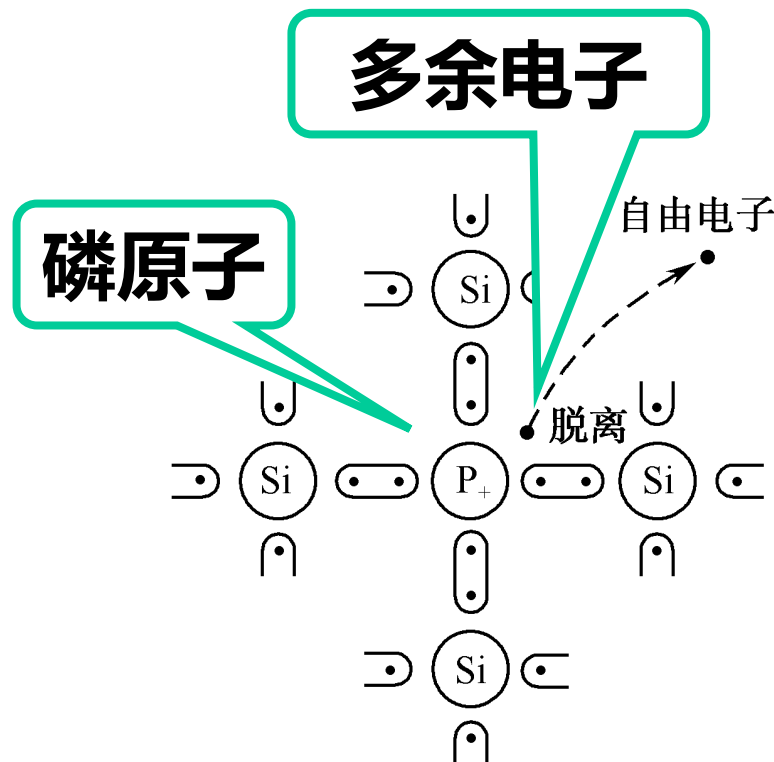
在硅或锗晶体中掺入少量的五价元素磷，晶体点阵中的某些硅原子被磷原子取代，磷原子的最外层有五个价电子，其中四个价电子与相邻的硅原子的价电子组成共价键。



多出的一个电子几乎不受磷原子的束缚，很容易被激发而成为自由电子，这样半导体中的自由电子数量大大增加，参与导电的载流子主要是自由电子。

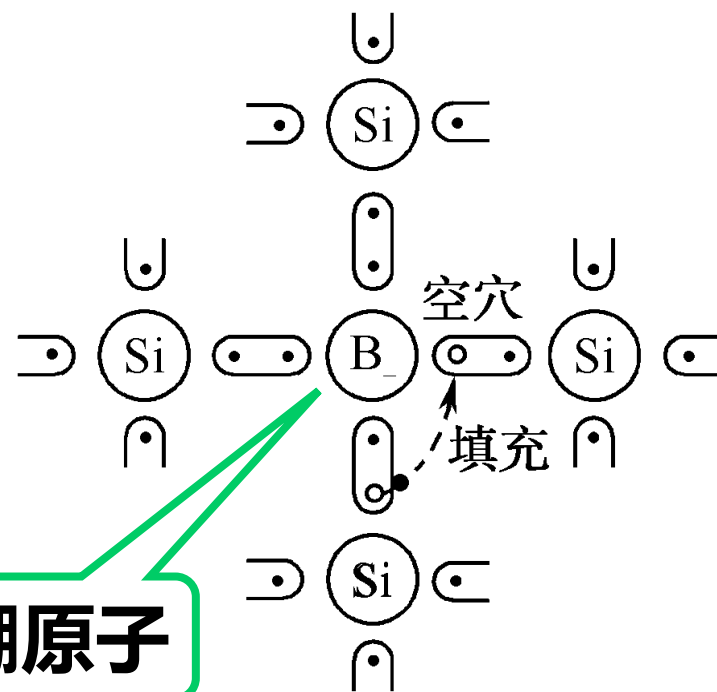
磷原子就成了不能移动的带正电的离子。

**N型半导体参与导电的是自由电子（多子）。**



## 2. P型半导体

在硅或锗晶体中掺入少量的三价硼元素，晶体点阵中的硅或锗原子被硼取代，硼原子的最外层有三个价电子，与相邻的硅或锗原子的价电子组成共价键时，产生一个空穴。



这个空穴要吸引价电子来填补，使得硼原子成为不能移动的带负电的离子。

P型半导体参与导电的是空穴（多子）

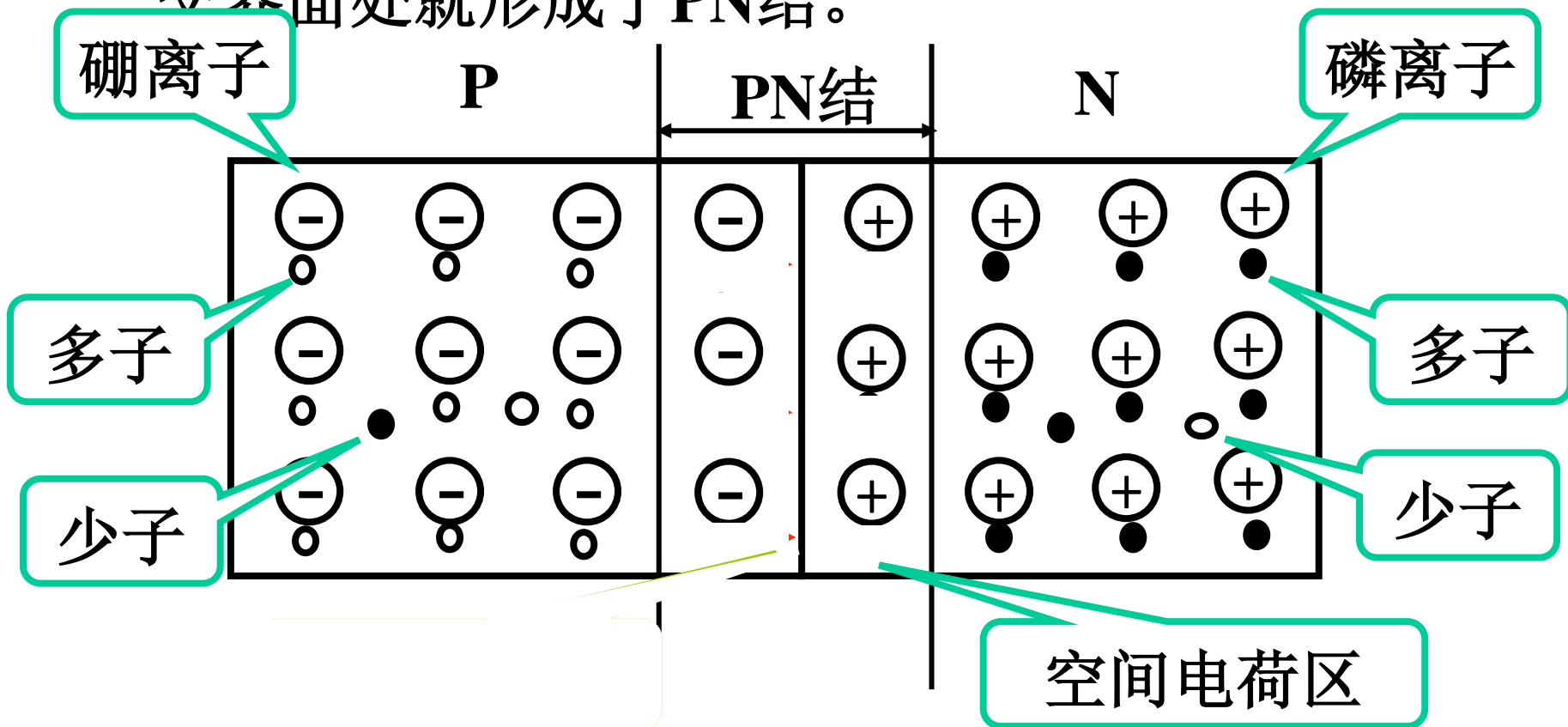
## 小 结

1. 半导体中的多数载流子是由掺杂产生的，少数载流子是由热激发产生的。由于数量的关系，起导电作用的主要是多数载流子。
2. N型半导体中自由电子是多子，空穴是少子。
3. P型半导体中空穴是多子，电子是少子。

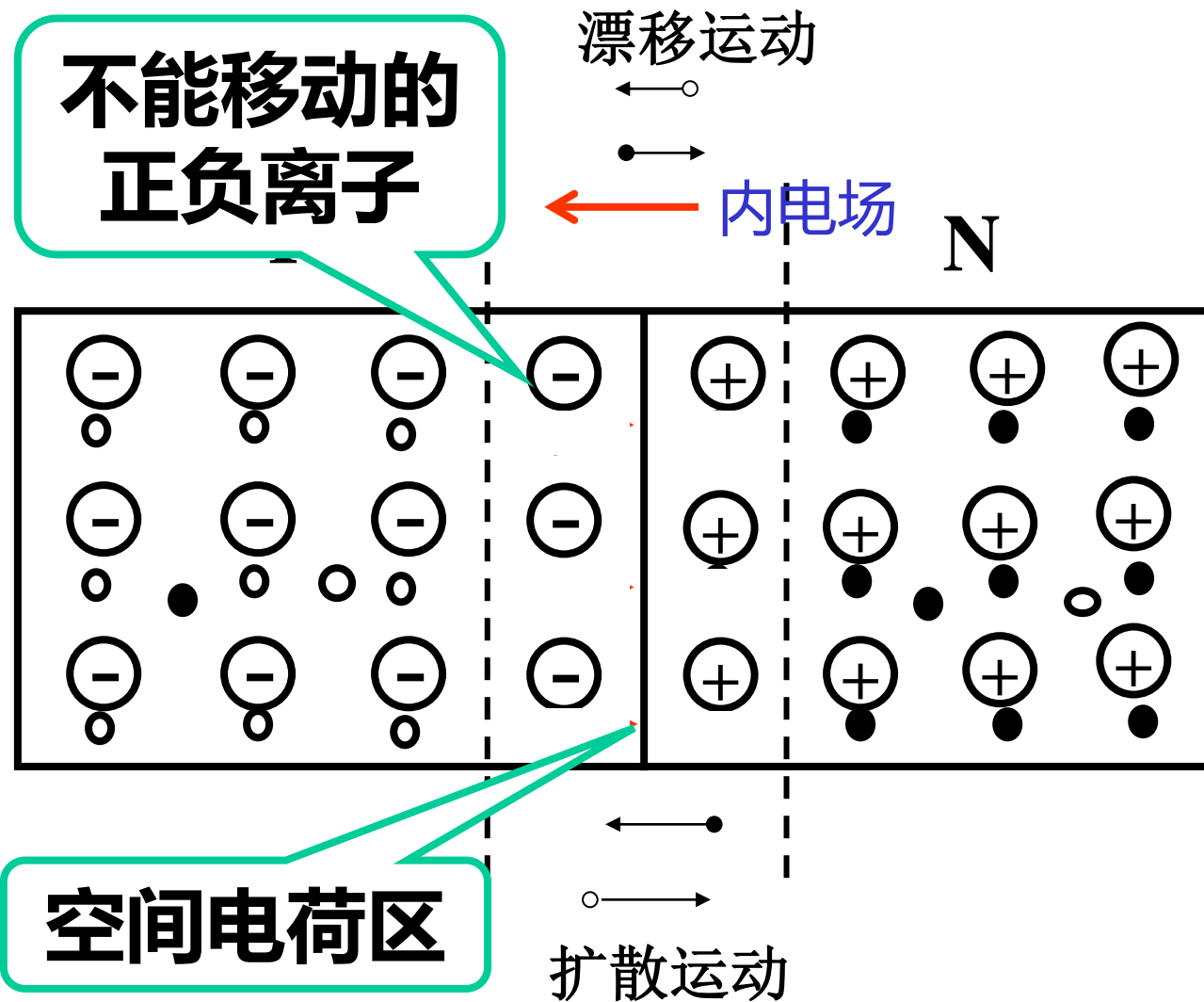
## 1.1.3 PN结

### 1. PN 结的形成

在同一片半导体的基片上，分别制造P型半导体和N型半导体，经过载流子的扩散，在它们的交界面处就形成了PN结。

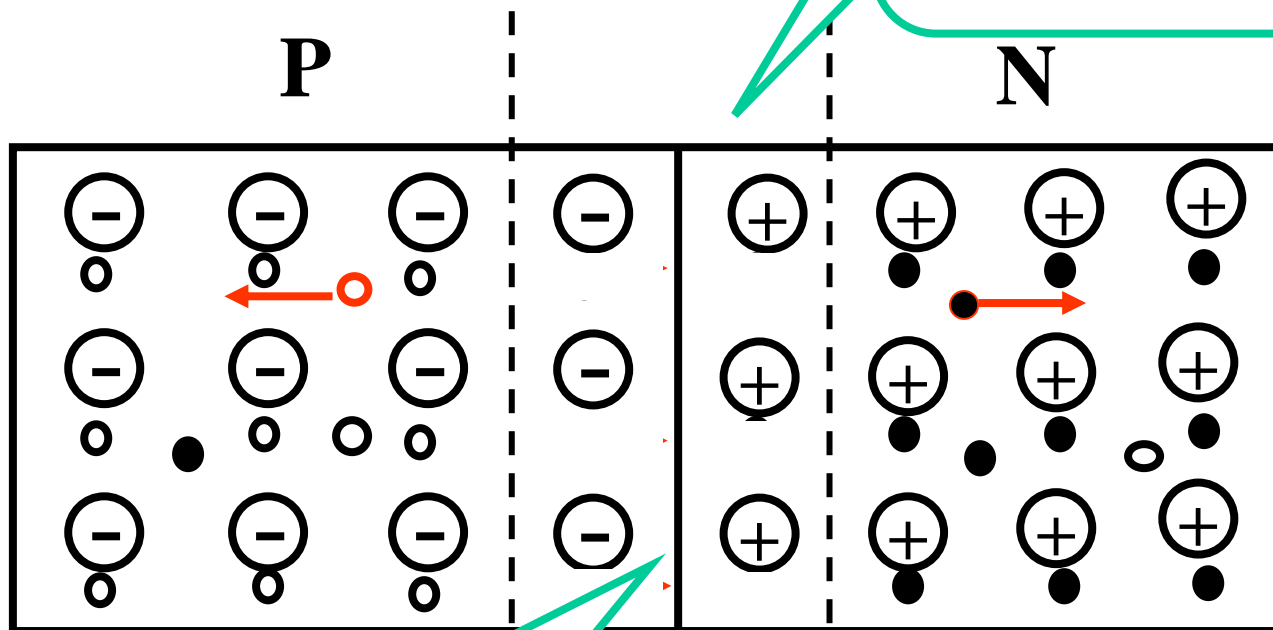


# PN结处载流子的运动



内电场对少子起驱动作用。

内电场越强，就使漂移运动越强，而漂移使空间电荷区变薄。

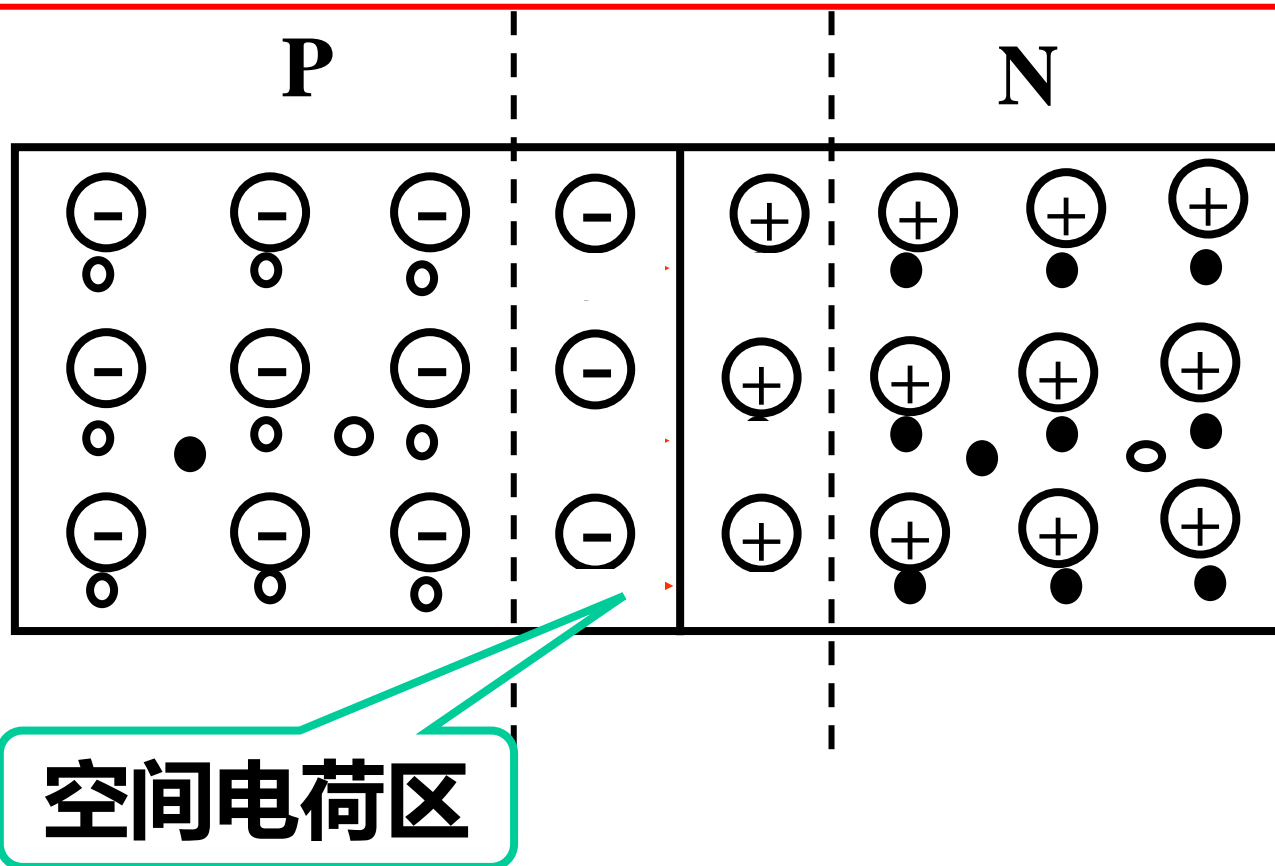


扩散的结果使空间电荷区逐渐加宽。

内电场对多子起阻碍作用。

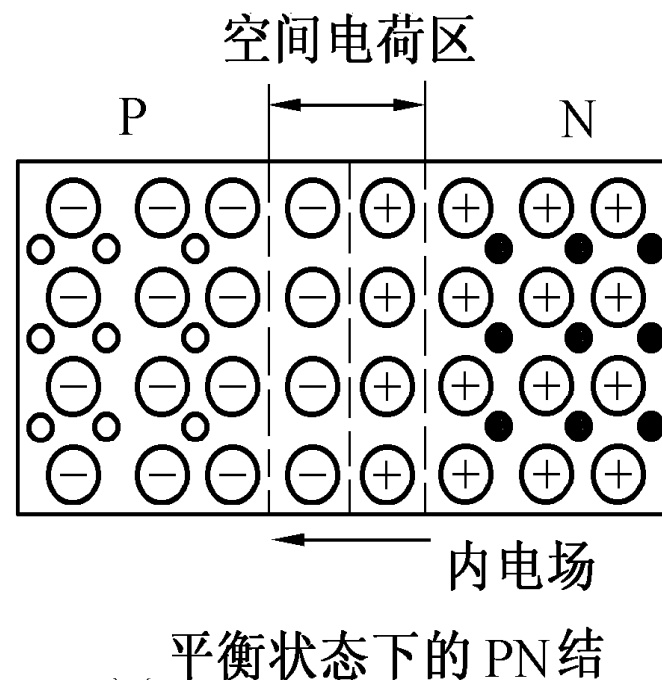


所以，扩散和漂移这一对相反的运动最终达到平衡，相当于两个区之间没有电荷运动，空间电荷区的厚度就固定不变。



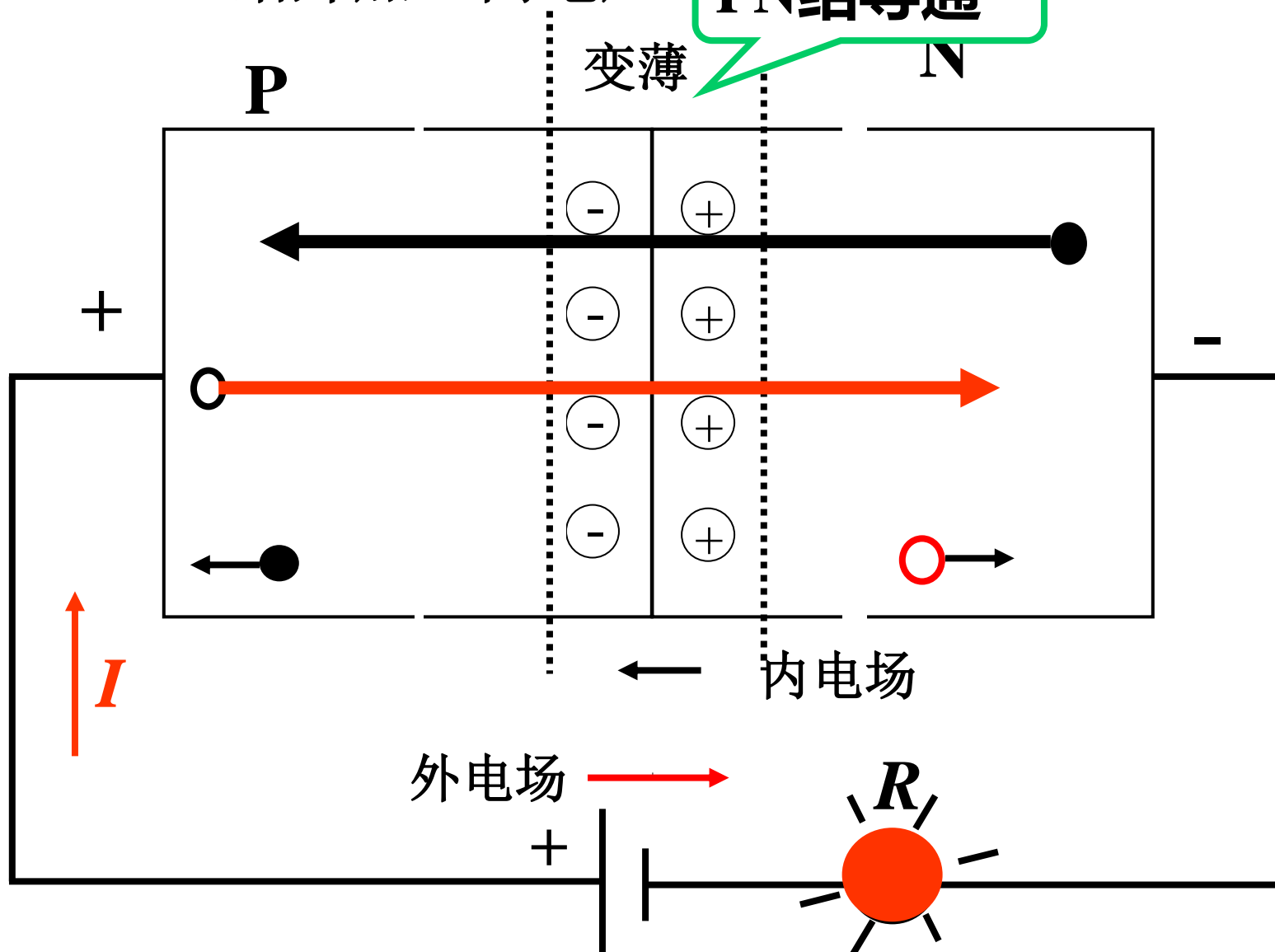
## 2. PN结的单向导电性

**PN结在不加电压时，多子和少子的运动达到动态平衡，PN结对外呈中性。**

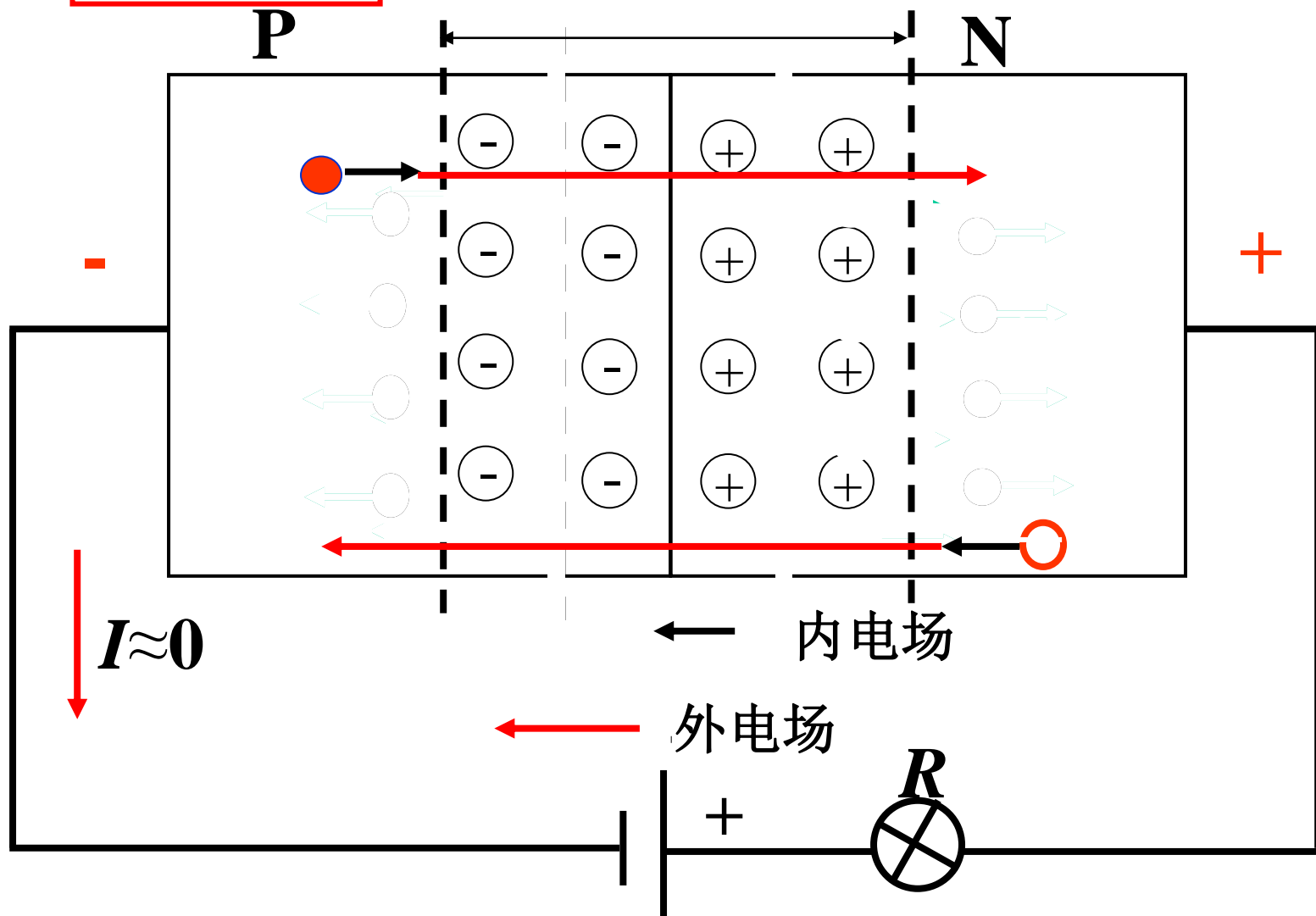


## (1) PN结外加正向电压

PN结导通



PN结截止



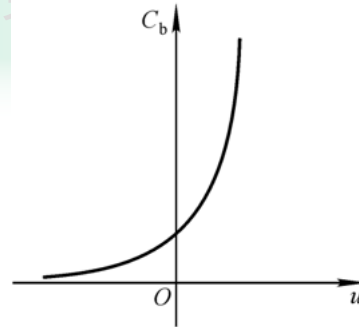
# 上次课复习

1. 半导体的导电特点是什么？什么叫本征半导体？
2. 本征半导体中有几种载流子参与导电？分别是什么载流子？
3. 什么叫N型半导体和P型半导体？
4. PN结具有什么特点？

### 3. PN 结的电容效应

#### (1) 势垒电容

PN结外加的反向电压发生变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电相同，其等效电容称为势垒电容 $C_b$ 。



#### (2) 扩散电容

PN结外加的正向电压发生变化时，在扩散过程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放过程，其等效电容称为扩散电容 $C_d$ 。

结电容：

$$C_j = C_b + C_d$$

1pF~几百pF

特点：1. 结电容具有非线性；2. 由于结面积小，低频时不起作用；3. 高频时要考虑结电容对电路工作的影响。

## 4. PN结的电流方程

由理论分析，有

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (\text{常温下 } U_T = 26\text{mV})$$

反向饱和  
电流

温度的  
电压当量

## 小结

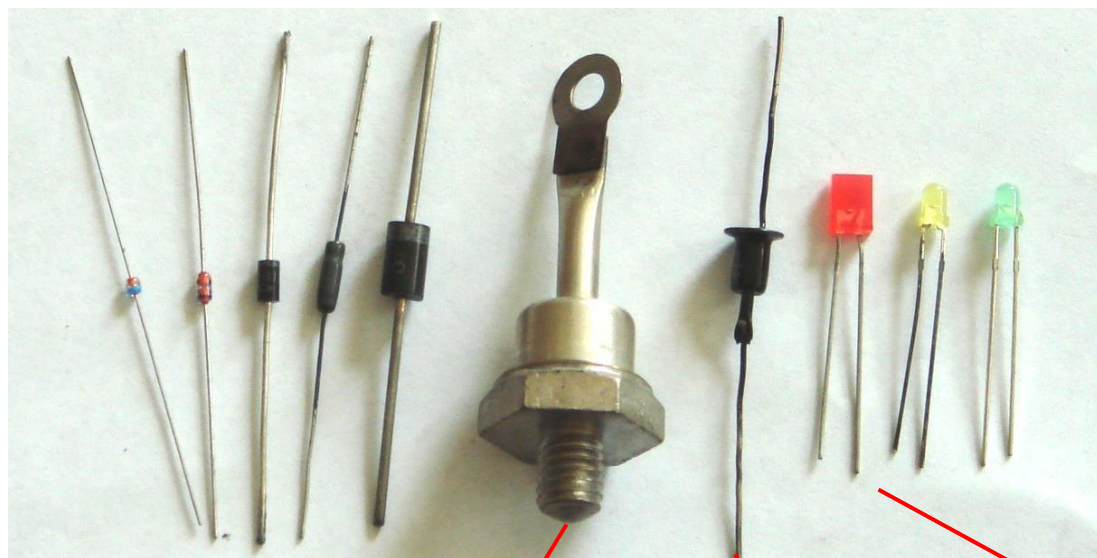
1. PN结外加正向电压时, PN结处于导通状态, 将电路接通;
2. PN结外加反向电压时, PN结处于截止状态, 将电路断开;
3. PN结具有单向导电的性质, 在电路中相当是电子开关。



## 1.2 半导体二极管

### 1. 基本结构

PN结加上管壳和引线，就成为半导体二极管。

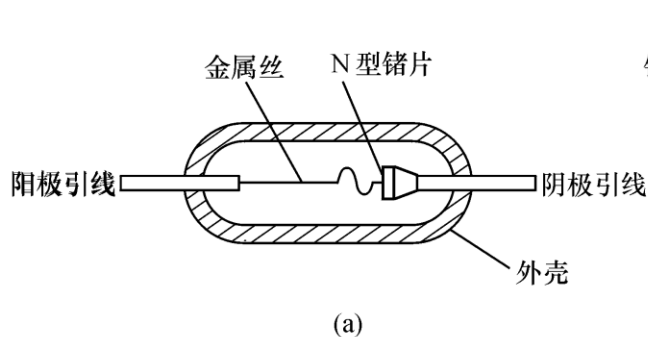


小功率  
二极管

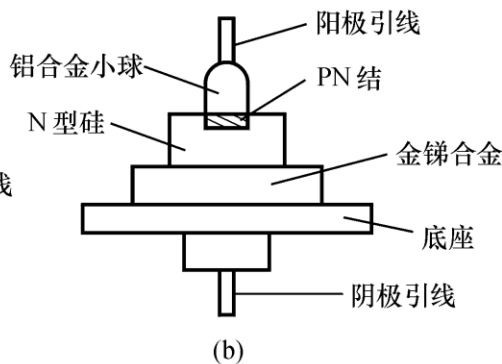
大功率  
二极管

稳压  
二极管

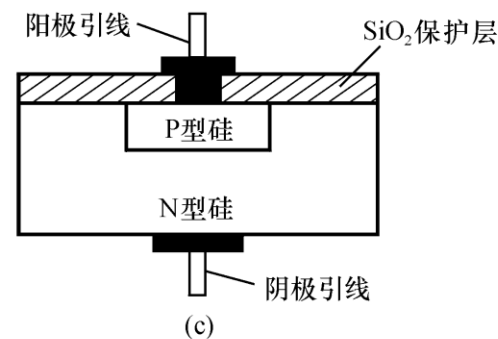
发光  
二极管



**点接触型：**结面积小，结电容小，故允许流过的电流小，则工作频率高。适用于高频电路和小功率整流。

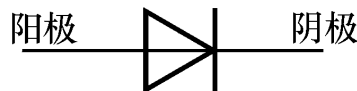


**面接触型：**结面积大，结电容大，故允许流过的电流大，则工作频率低。适用于大功率整流。

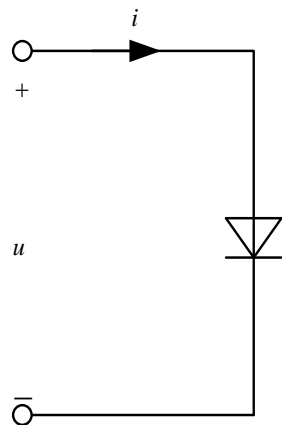


**平面型：**结面积可小、可大。小的工作频率高，可做数字电路中的开关管，大的允许流过的电流大，工作频率低，可做低频大功率整流管。

## 二极管的符号



## 2. 电流方程



在近似分析中，PN结的电流方程就是二极管的电流方程。

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (\text{常温下 } U_T = 26\text{mV})$$

反向饱和  
电流

温度的  
电压当量

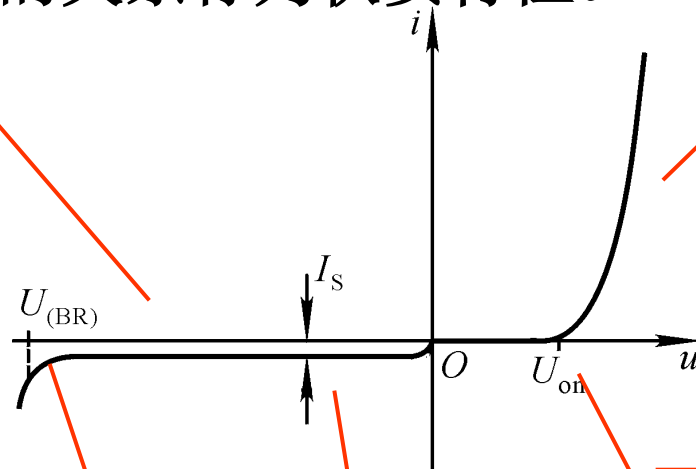
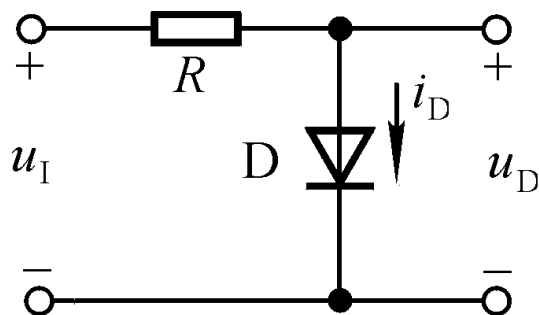
### 3. 伏安特性

反向特性为横轴的平行线

正向特性为指数曲线

二极管的电流与其端电压的关系称为伏安特性。

$$i = f(u)$$



击穿电压

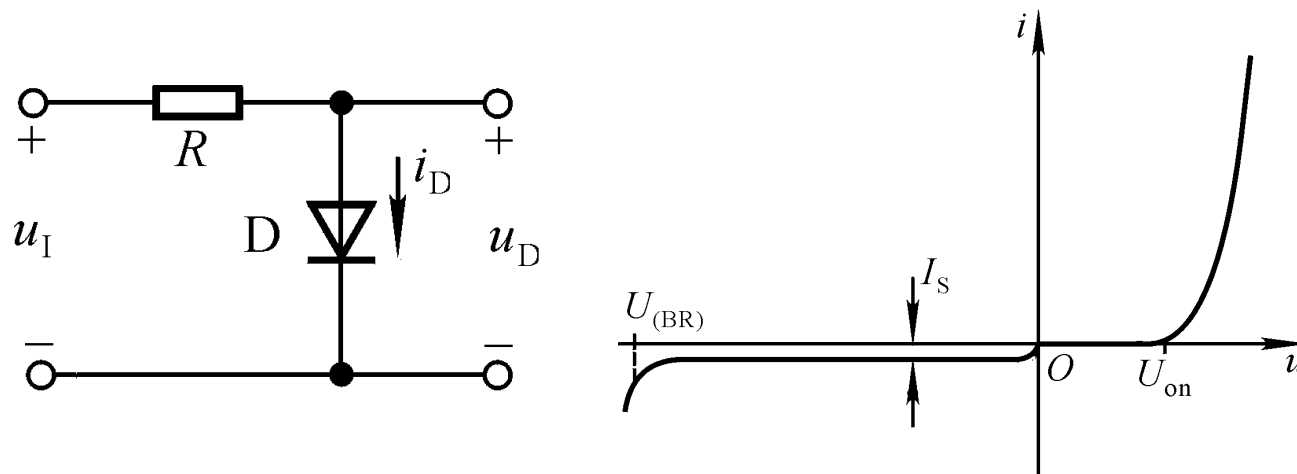
反向饱和和电流

开启电压

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

若正向电压  $u \gg U_T$ , 则  $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$

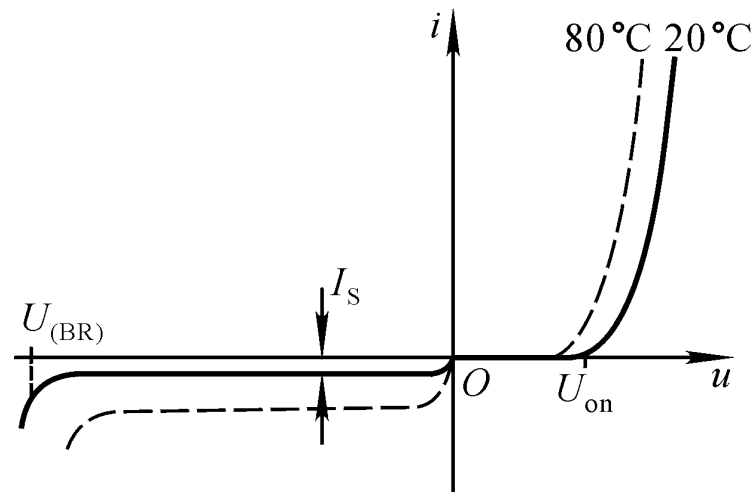
若反向电压  $|u| \gg U_T$ , 则  $i \approx -I_S$



材料	开启电压	导通电压	反向饱和电流
硅Si	0.5V	0.6~0.7V	1 $\mu$ A以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十 $\mu$ A

从二极管的伏安特性上可以反映出：

(1) 单向导电性



(2) 伏安特性受温度影响

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow$  在电流不变情况下管压降  $u \downarrow$

$\rightarrow$  反向饱和电流  $I_S \uparrow$ ,  $U_{(BR)} \downarrow$

增大1倍/ $10^{\circ}\text{C}$

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow$  正向特性左移, 反向特性下移

## 4.主要参数

### (1) 最大整流电流 $I_F$

是指二极管正向导通时允许流过的最大正向平均电流。正常使用时，不能超过此值，否则将烧坏二极管。

### (2) 最高反向峰值电压 $U_R$

是指二极管反向截止时允许外加的最高反向工作电压。正常使用时，应该是击穿电压 $U_R$ 的一半，否则将烧坏二极管。

### (3) 反向峰值电流 $I_R$

是指在常温下二极管外加反向峰值电压时，流经管子的电流。此电流值受温度影响，硅管反向电流小，锗管较大。

### (4) 最高工作频率 $f_M$

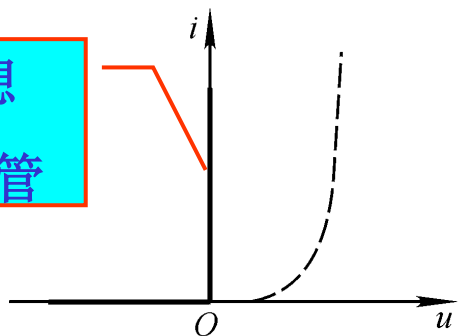
是指二极管工作的上限截止频率。因PN结有电容效应，工作频率超过此值时，二极管的单向导电性变差。

## 4. 等效电路

### (1) 将伏安特性折线化

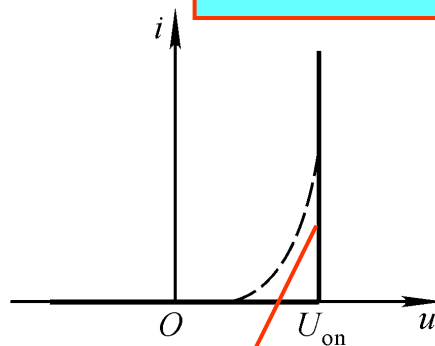
导通时  $\Delta i$  与  $\Delta u$   
成线性关系

理想  
二极管



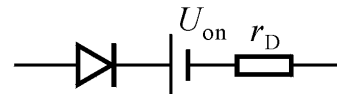
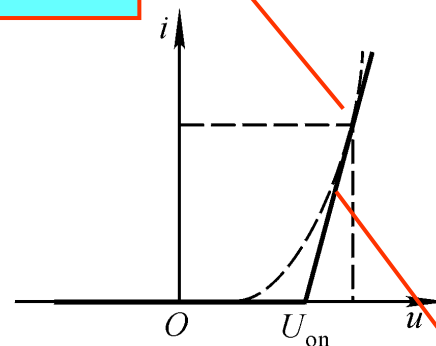
理想开关

导通时  $U_D = 0$   
截止时  $I_R = 0$



近似分析  
中最常用

导通时  $U_D = U_{on}$   
截止时  $I_R = 0$



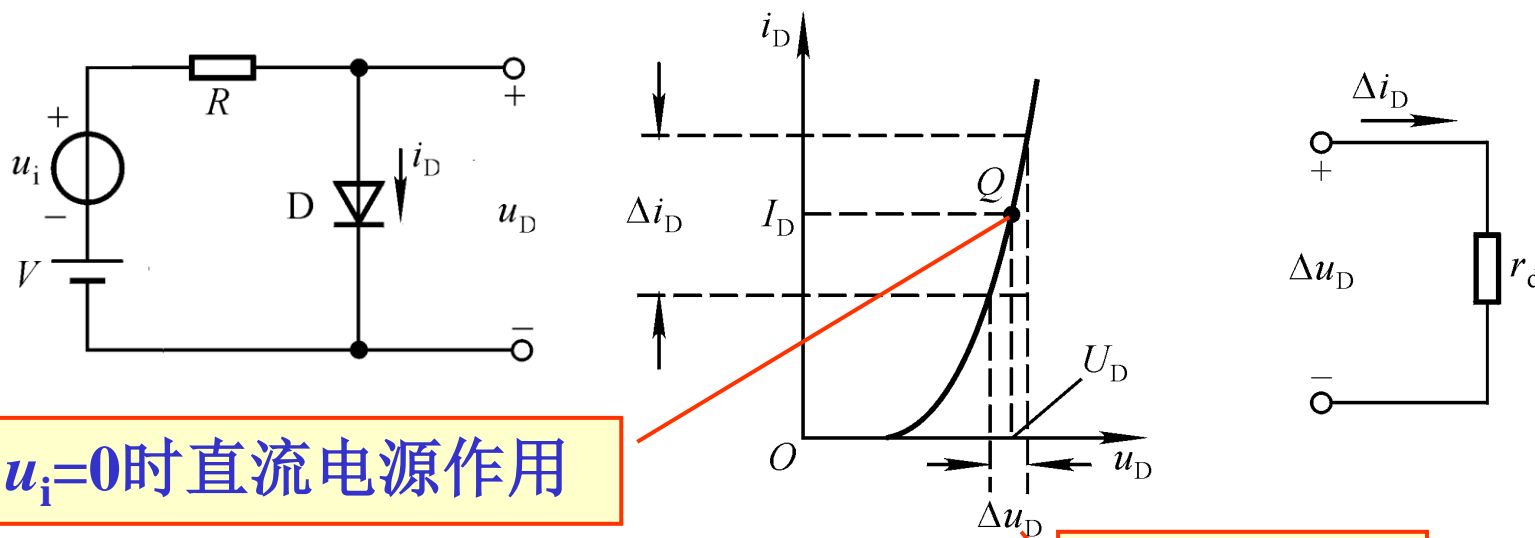
直线的斜率为  
 $1/r_D$

应根据不同情况选择不同的等效电路。



## (2) 微变等效电路

当二极管在静态基础上有一动态信号作用时，则可将二极管等效为一个电阻，称为动态电阻，也就是微变等效电路。



$u_i=0$ 时直流电源作用

$$\text{根据电流方程, } r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{U_T}{I_D}$$

小信号作用

$Q$ 越高,  $r_d$ 越小。

静态电流

公式推导见教材 (1.2.1)

## 小结

1. 二极管外加正向电压时, 处于导通状态,
2. 二极管外加反向电压时, 处于截止状态,
3. 二极管具有单向导电的性质, 在电路中相当是电子开关。
4. 二极管的典型工作电压值:

材料	开启电压	导通电压
硅 <b>Si</b>	<b>0.5V</b>	<b>0.6~0.7V</b>
锗 <b>Ge</b>	<b>0.1V</b>	<b>0.1~0.3V</b>

## 5. 应用举例

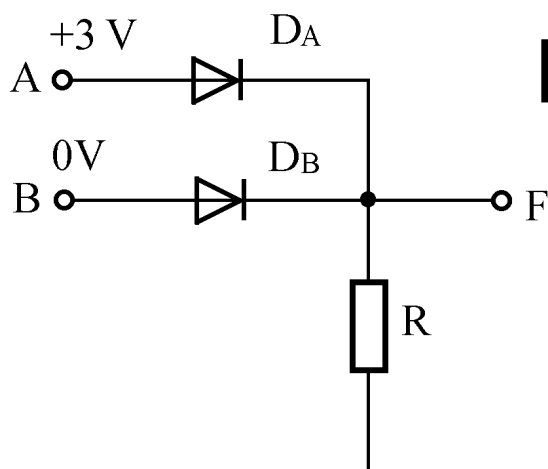
---

二极管的应用范围很广：开关、隔离、钳位、整流、保护等。

二极管在应用时需要掌握两点：

- (1) 如何判断二极管的工作状态？
- (2) 什么情况下应选用二极管的什么等效电路？

【例1.2.1】求F点的电位，说明两个管子的作用。



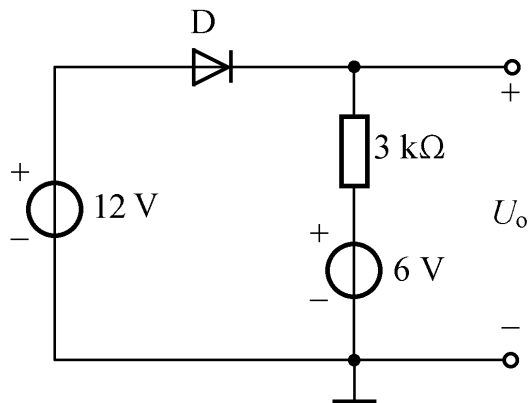
【解】 设二极管为理想二极管

因为  $V_A > V_B$ ，所以  $D_A$  优先导通，

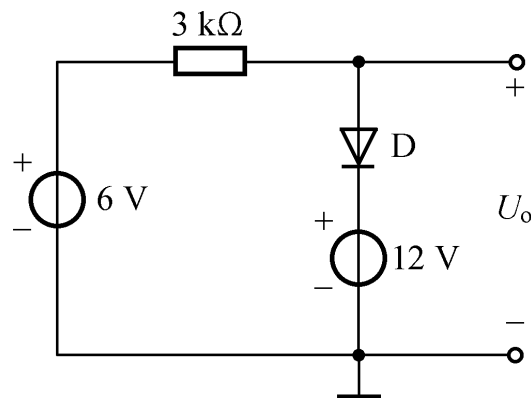
$$V_F = 3V;$$

$D_B$  承受反向电压而截止。

$D_A$  起钳位作用，  $D_B$  起隔离作用。

**【例1.2.2】求 $U_o$** 

(a)



(b)

**【解】** 设二极管为理想二极管

(a) 图中，二极管D的阳极电位高于阴极电位，二极管D导通， $U_o = 12\text{V}$ 。

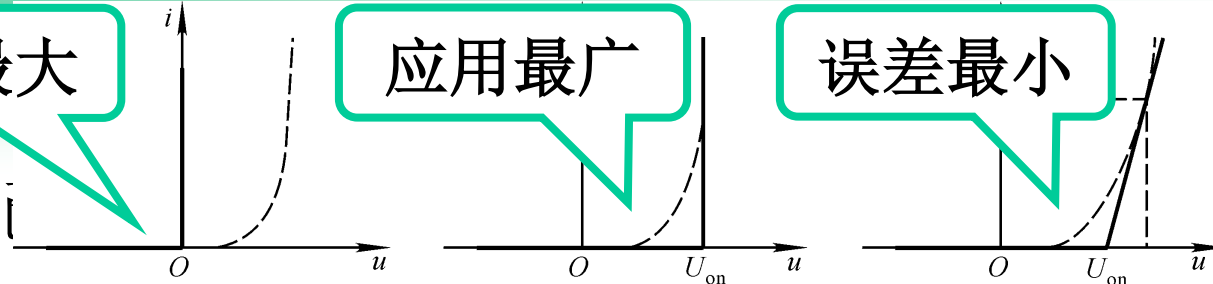
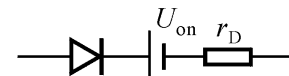
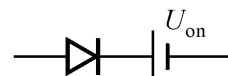
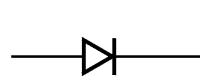
(b) 图中，二极管D的阳极电位低于阴极电位，二极管D截止， $U_o = 6\text{V}$ 。

误差最大

应用最广

误差最小

## 【例1.2.3】

试分析当  $V =$ 【解】  $V = 30\text{V}$  时，等效为理想二极管

$$I \approx \frac{V}{R} = \frac{30}{10 \times 10^3} = 3\text{mA}$$

 $V = 6\text{V}$  时，考虑二极管的管压降

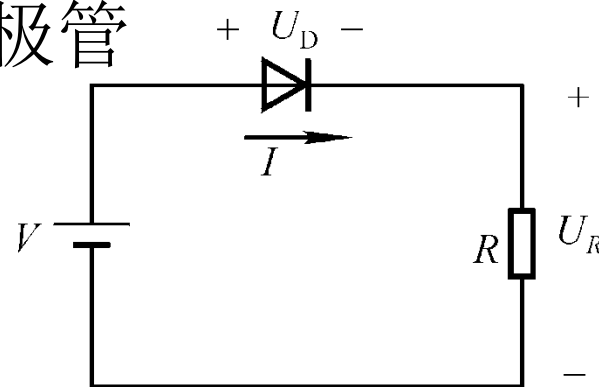
$$I \approx \frac{V - U_D}{R} = \frac{6 - 0.7}{10 \times 10^3} = 0.53\text{mA}$$

 $V = 1.5\text{V}$  时，接近二极管的管压降，需要测伏安特性设  $U_{\text{on}} = 0.55\text{V}$ ,  $r_D = 200\Omega$ 

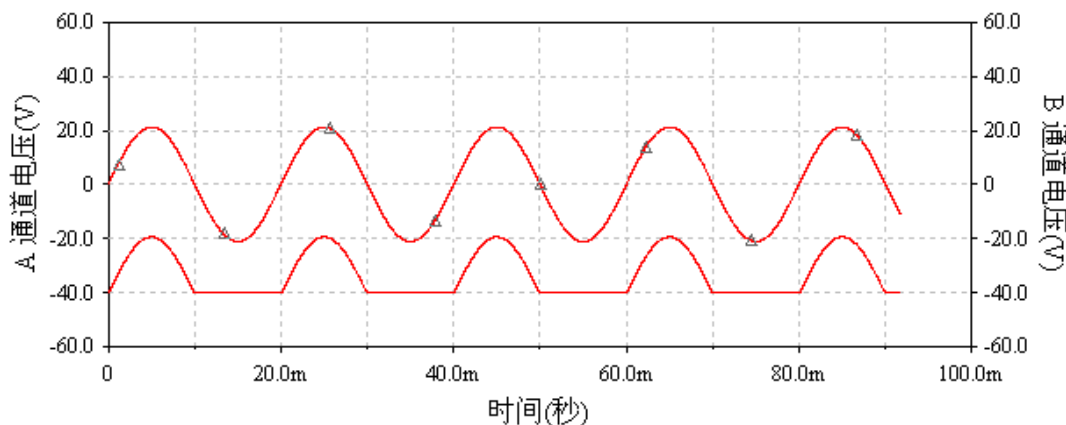
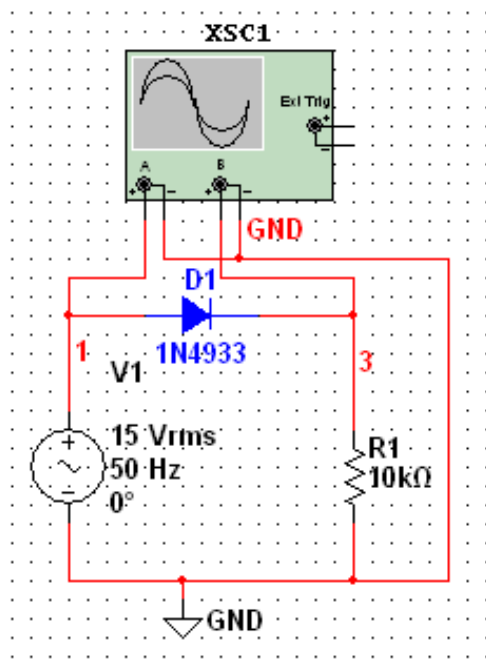
$$U_D = U_{\text{on}}$$

$$I = \frac{V - U_{\text{on}}}{R + r_D} = \frac{(1.5 - 0.55)\text{V}}{(10 + 0.2)\text{k}\Omega} \approx 0.093\text{mA}$$

根据不同情况选择不同的等效电路，才能减小估算误差。



## 【引例分析】



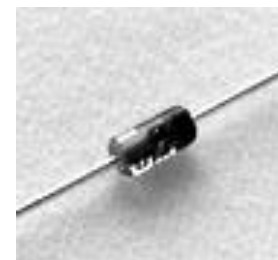
当输入电压为正半波时，二极管**D1**因阳极电位最高而导通，输出电压波形与输入电压波形

相同；当输入电压为负半波时，二极管**D1**因阳极电位最低而截止，输出电压为零。可见，由于二极管的单向导电作用，使正弦交流电压变为单向脉动的直流电压，二极管在此电路中起整流作用。

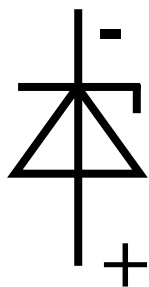
# 1.3 稳压二极管

## 1. 基本结构

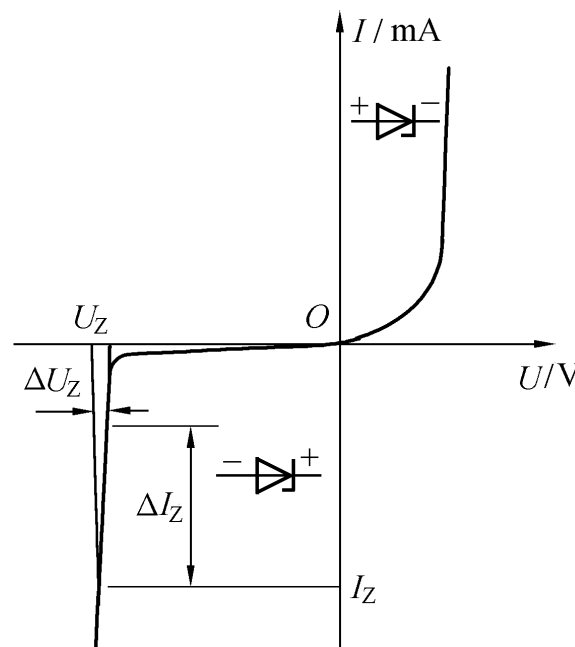
稳压管是特殊的面接触型二极管。



## 2. 伏安特性



符号

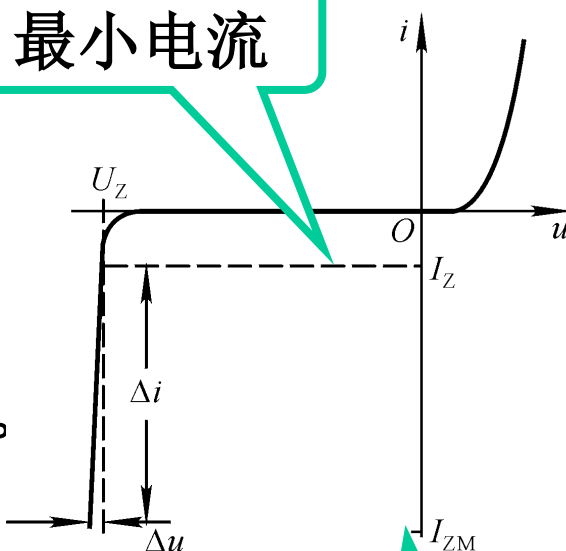


伏安特性



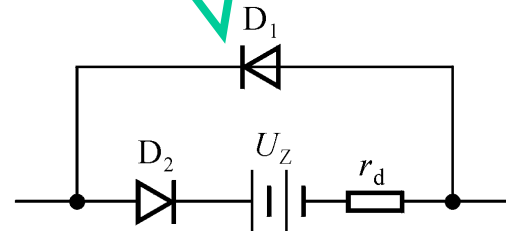
稳压管正常工作的区域是反向击穿区。

从反向特性上可见，由于反向特性很陡，稳压管中的电流可在很大范围内变化，而其两端电压基本不变。所以说，稳压管具有稳压的作用。



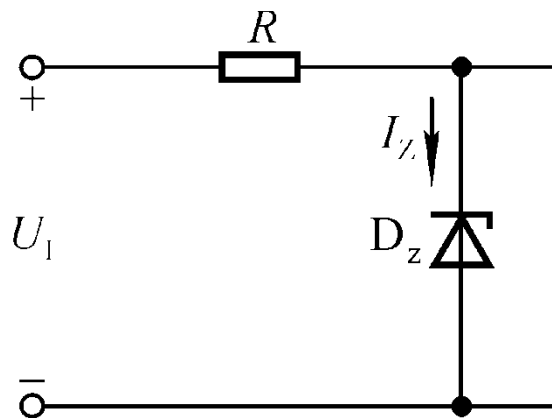
最小电流

没有击穿，  
正向导通



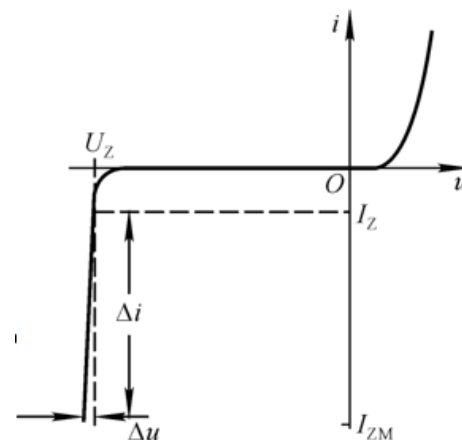
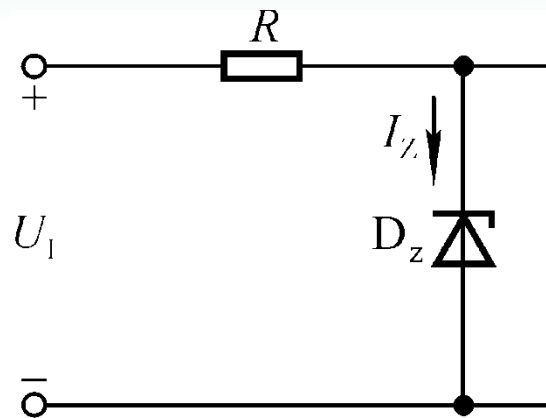
击穿时等效电路

最大电流



稳压管正常工作时必须与一个电阻串联，才能起到稳压的作用。

若稳压管的电流太小则不稳压，若稳压管的电流太大则会因功耗过大而损坏，因而稳压管电路中必需有限制稳压管电流的限流电阻！



### 3. 主要参数

(1) 稳定电压  $U_Z$

(2) 稳定电流  $I_Z$

(3) 最大功耗  $P_{ZM}$

$$P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$$

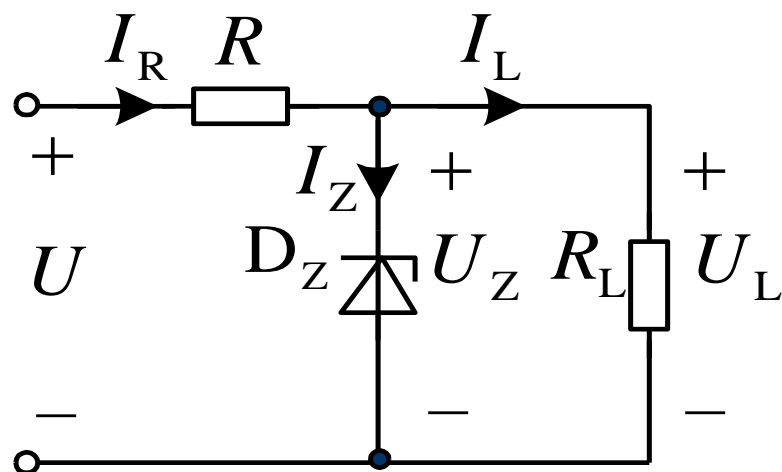
(4) 动态电阻  $r_z$

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

几欧到几十欧

## 4. 应用举例

【例1.3.1】在图示电路中，已知 $U=20V$ ， $R=2k\Omega$ ， $R_L=6k\Omega$ ， $U_Z=6V$ ， $I_{ZM}=10mA$ 。  
试求：1.  $U_L$ ， 2. 分析稳压原理



【解】

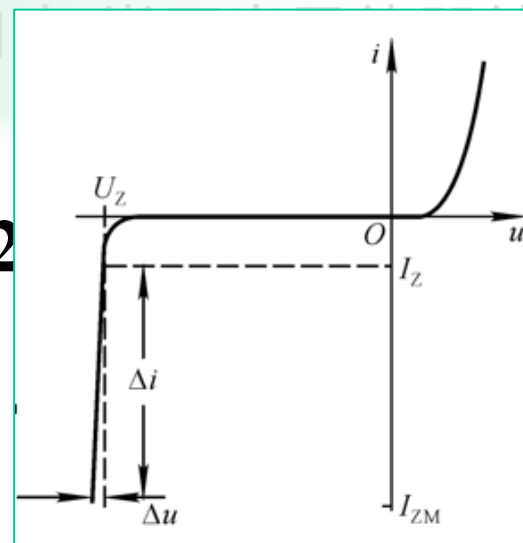
1.  $U_L = 6V$

2. 设电源电压波动  
(负载不变)

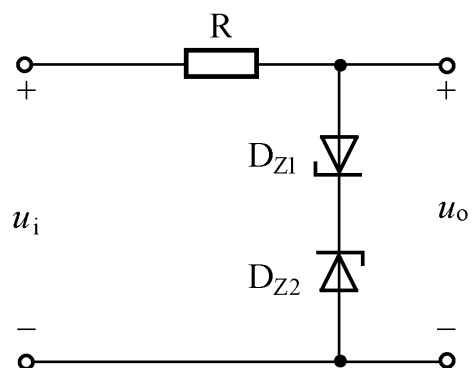
$$U \uparrow \rightarrow U_L \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_L \downarrow$$

设负载变化 (电源电压不变)

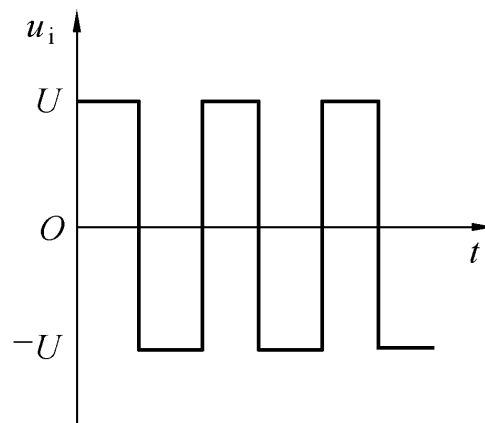
$$R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow U_L \downarrow \rightarrow U_Z \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_R \downarrow \rightarrow U_L \uparrow$$



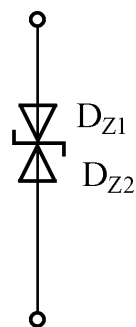
# 【例1.3.2】稳压管的限幅作用。



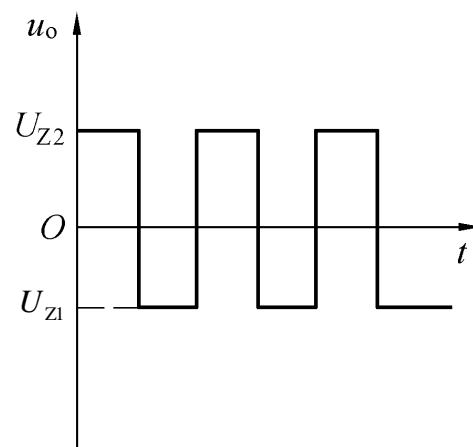
(a) 限幅电路



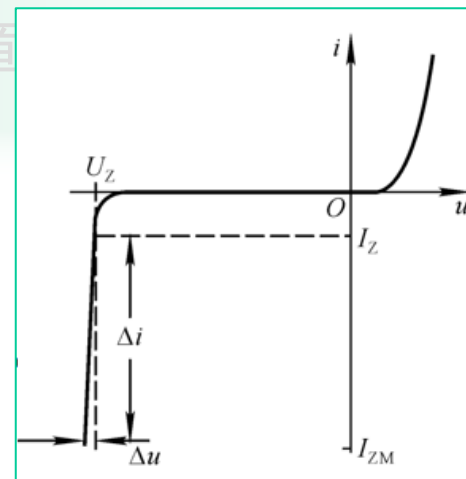
(b) 限幅电路的输入电压波形



(d) 双向稳压管的符号



(c) 限幅电路的输出电压波形



【例1.3.3】 已知 $U_Z = 6V$ ,  $I_{Z\min} = 5mA$ ,  $I_{Z\max} = 25mA$ ;  
负载电阻 $R_L = 600\Omega$ 。求限流电阻 $R$ 的取值范围。

【解】

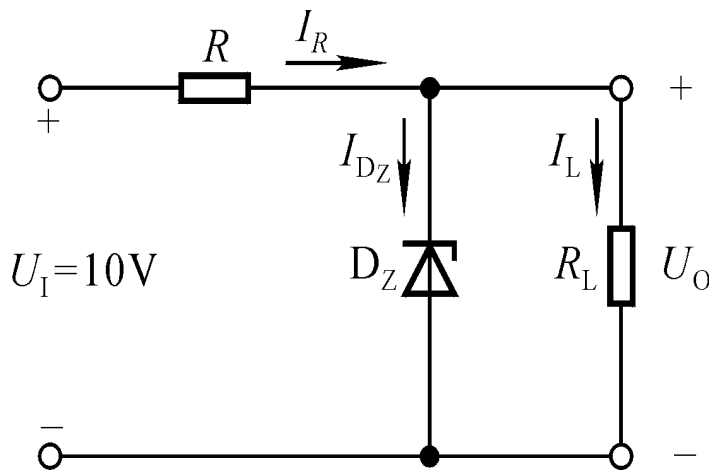
$$U_R = U_1 - U_Z = 10 - 6 = 4V$$

$$I_L = \frac{6}{600} = 10mA$$

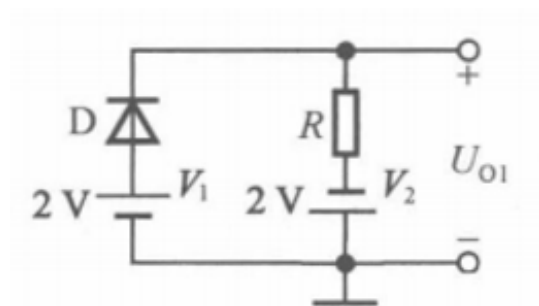
$$I_{R\min} = I_{DZ\min} + I_L = 5 + 10 = 15mA$$

$$I_{R\max} = I_{DZ\max} + I_L = 25 + 10 = 35mA$$

$$R_{\max} = \frac{U_R}{I_{R\min}} = \frac{4}{15 \times 10^{-3}} \approx 267\Omega \quad R_{\min} = \frac{U_R}{I_{R\max}} = \frac{4}{35 \times 10^{-3}} \approx 114\Omega$$

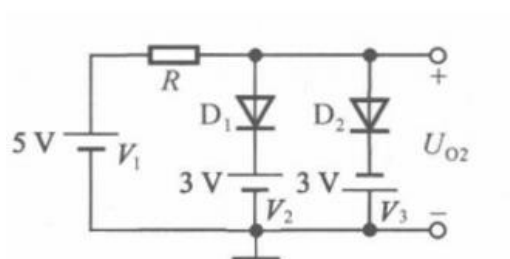


练习题1. 求输出电压。设二极管的导通压降为0.7V。



D导通,  $U_{o1} = 2 - 0.7 = 1.3V$

练习题2. 求输出电压。设二极管的导通压降为0.7V。



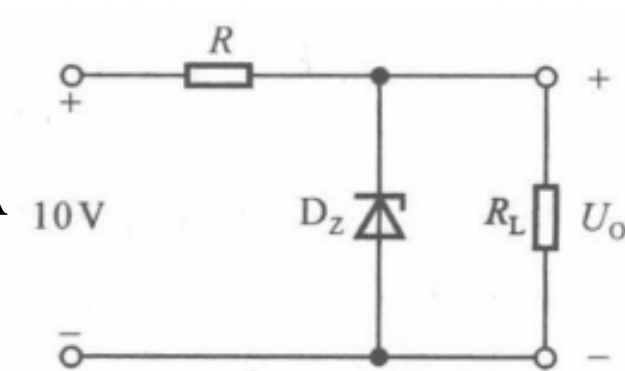
$D_2$ 的阴极电位最低, 则 $D_2$ 导通。

$U_{o2} = -3 + 0.7 = -2.3V$

练习题3. 已知电路如图所示,  $U_Z = 6V, I_{Zmin} = 5mA$ , 试求:  
若  $R_L = 5k\Omega$  当  $R = 500\Omega$  和  $5k\Omega$  时, 求  $U_O$ 。

解: (1) 若  $R_L = 5k\Omega$  当  $R = 500\Omega$  时,

$$\begin{aligned} I_{D_Z} &= I_R - I_L = \frac{10 - 6}{500} - \frac{6}{5 \times 10^3} = (8 - 1.2) \text{mA} \\ &= 6.8 \text{mA} > I_{Zmin}, \text{ 所以 } U_O = 6V \end{aligned}$$

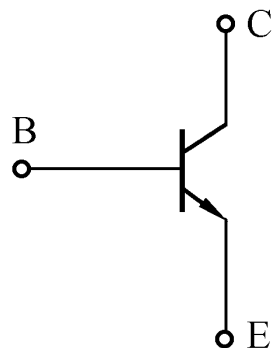
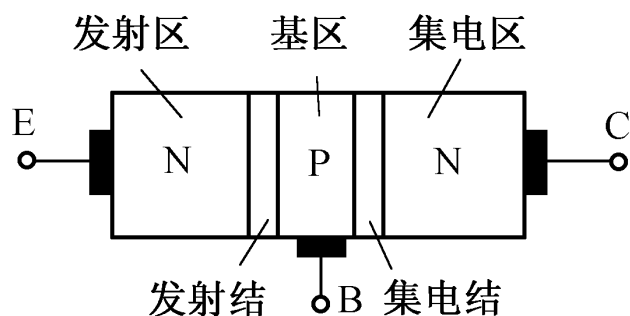
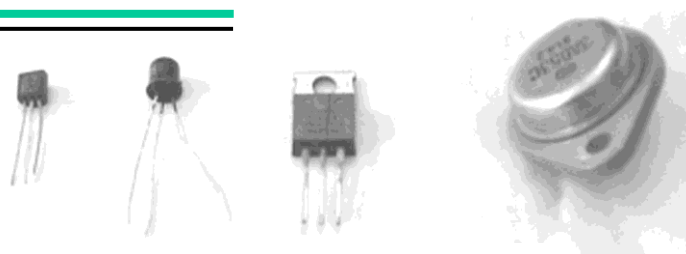


(2) 若  $R_L = 5k\Omega$  当  $R = 5k\Omega$  时,

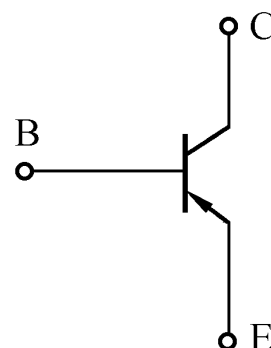
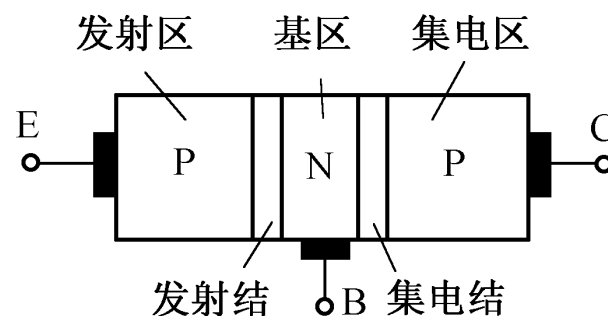
$$\begin{aligned} I_{D_Z} &= I_R - I_L = \frac{10 - 6}{5 \times 10^3} - \frac{6}{5 \times 10^3} = (0.8 - 1.2) \text{mA} \\ &= -0.4 \text{mA} < I_{Zmin}, \text{ 稳压管截止, } U_O = \frac{R}{R + R_L} \times 10 = 5V \end{aligned}$$

# 1.4 晶体三极管

## 1.基本结构



NPN型电路符号

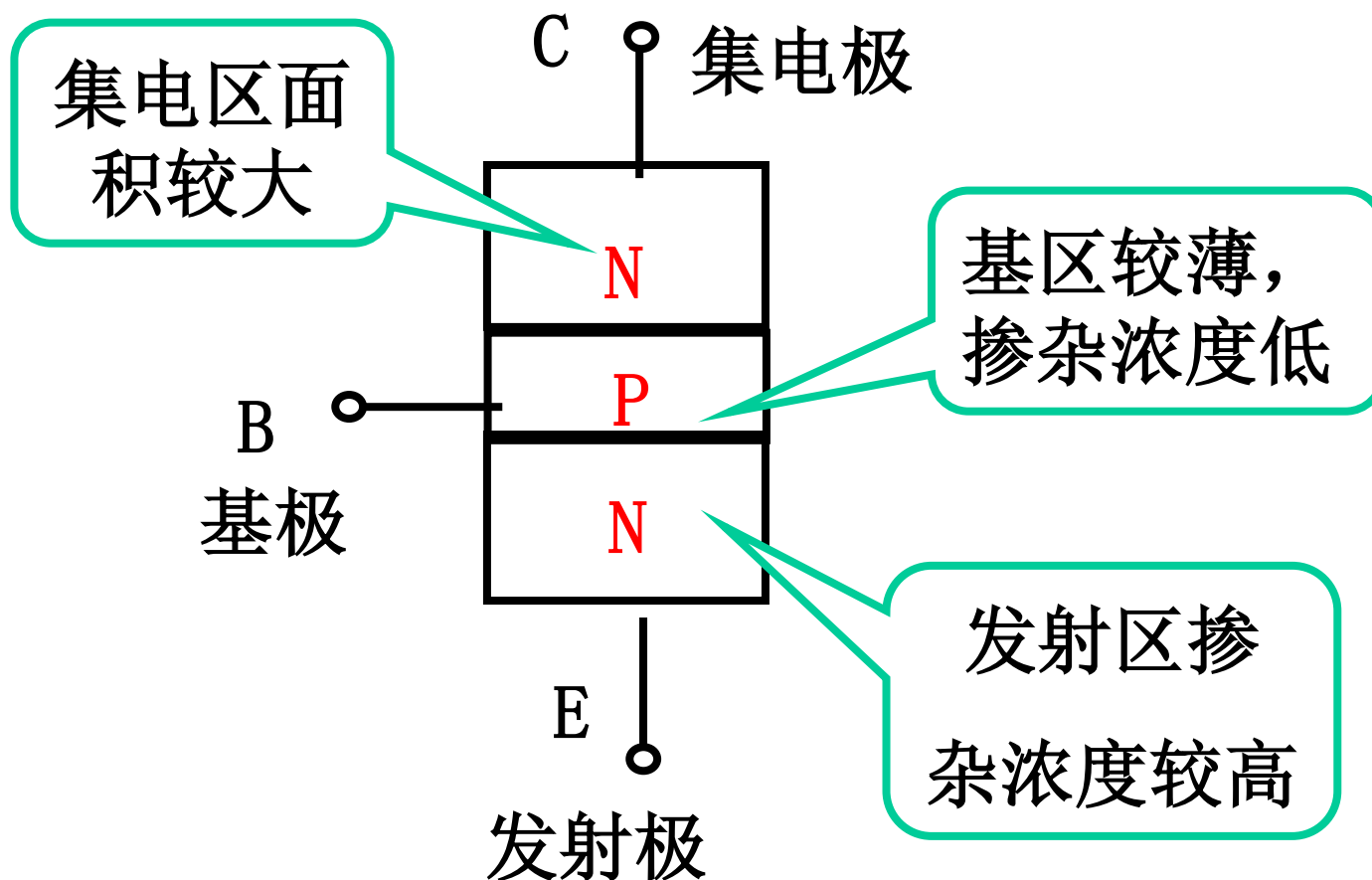


PNP型电路符号

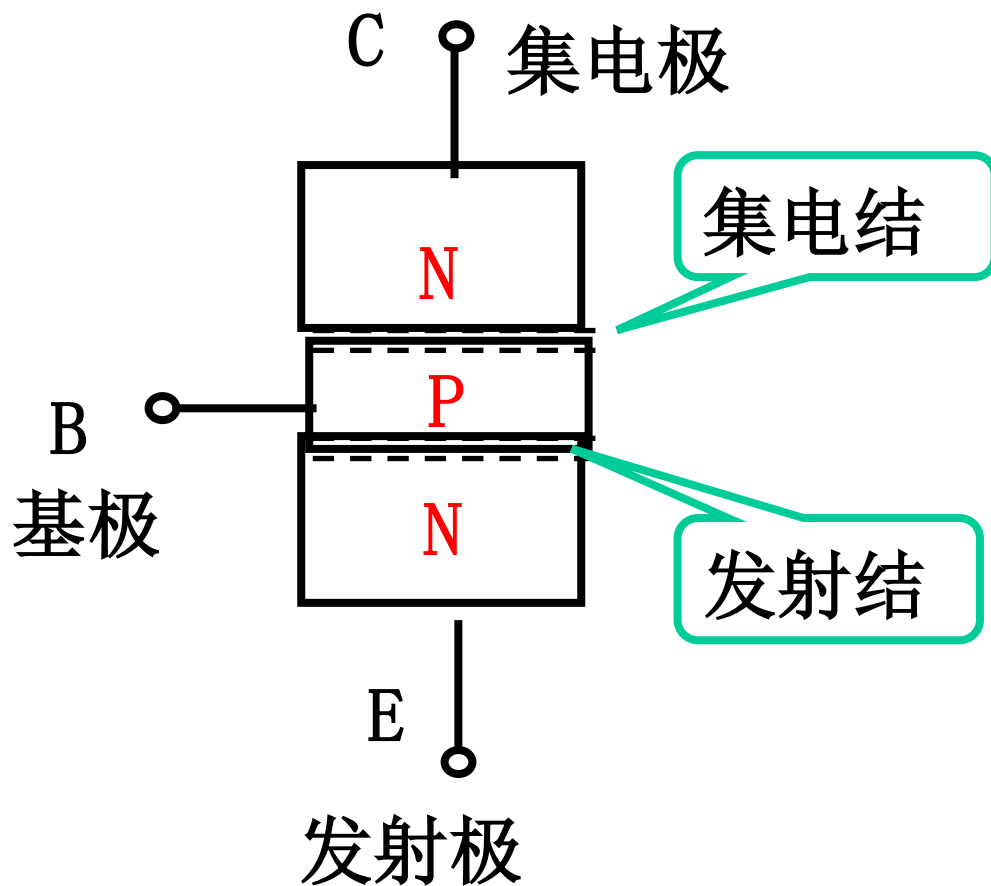


结构特点： 从掺杂浓度上， $E > C > B$

从尺寸上， $C > E > B$

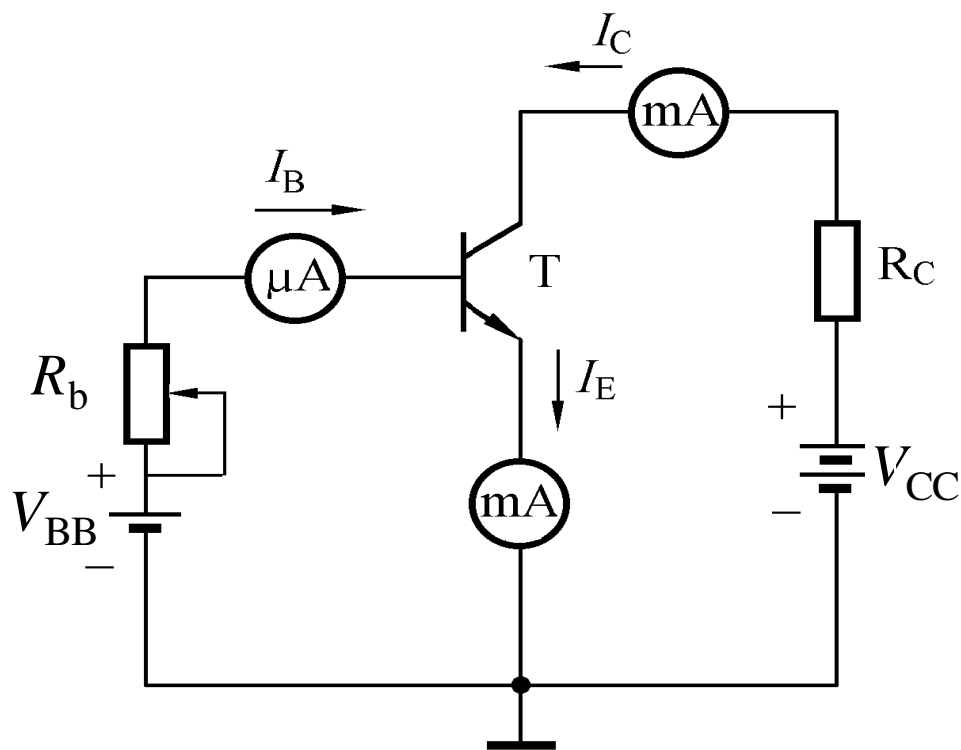


两个PN结：



## 2. 电流放大原理

实验电路： $V_{BB}$ 是基极电源， $R_b$ 是基极电阻。



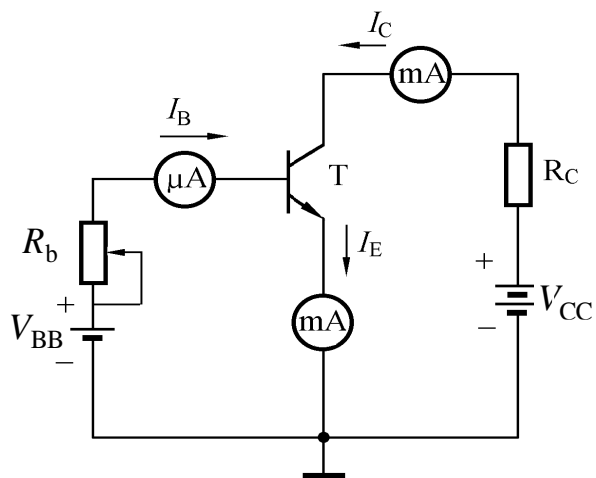
$V_{CC}$ 是集电极电源， $R_C$ 是集电极电阻。

发射极是公共端，这种接法称为共发射极接法。

发射结外加正向电压，集电结外加反向电压。

**实验结果：**改变 $R_b$ ，基极电流 $I_B$ ，集电极电流 $I_C$ ，发射极电流 $I_E$ 的变化如下表。

$I_B / \text{mA}$	-0.01	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
$I_C / \text{mA}$	0.001	0.01	0.7	1.5	2.3	3.1	3.95
$I_E / \text{mA}$	0	0.01	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

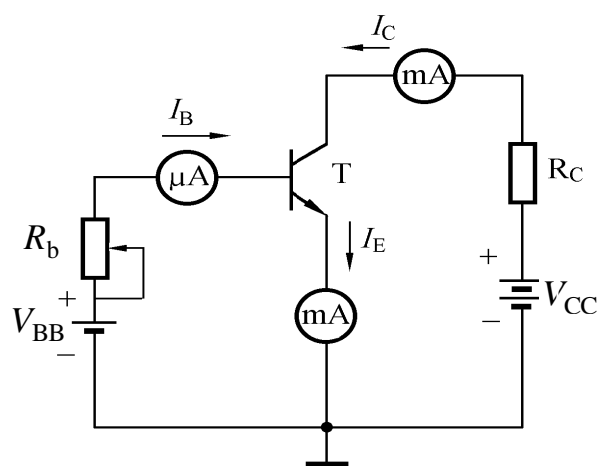


$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C \gg I_B$$

**结论：**晶体管具有电流放大作用。

$I_B / \text{mA}$	-0.01	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
$I_C / \text{mA}$	0.001	0.01	0.7	1.5	2.3	3.1	3.95
$I_E / \text{mA}$	0	0.01	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05



$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{2.3}{0.06} = 38.3$$

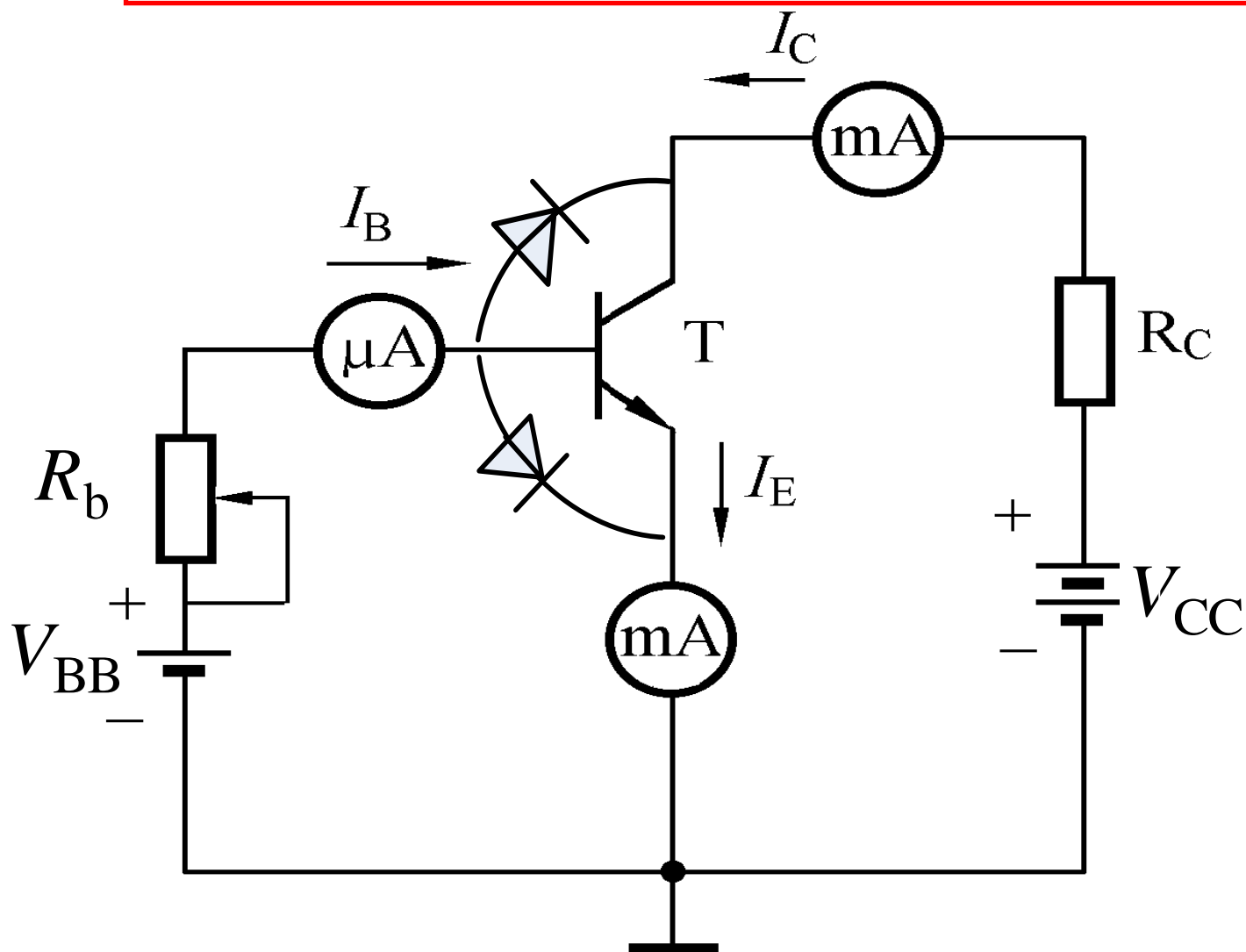
$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = \frac{0.8}{0.02} = 40$$

$I_C$ 与 $I_B$ 之比称为电流放大倍数，即

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

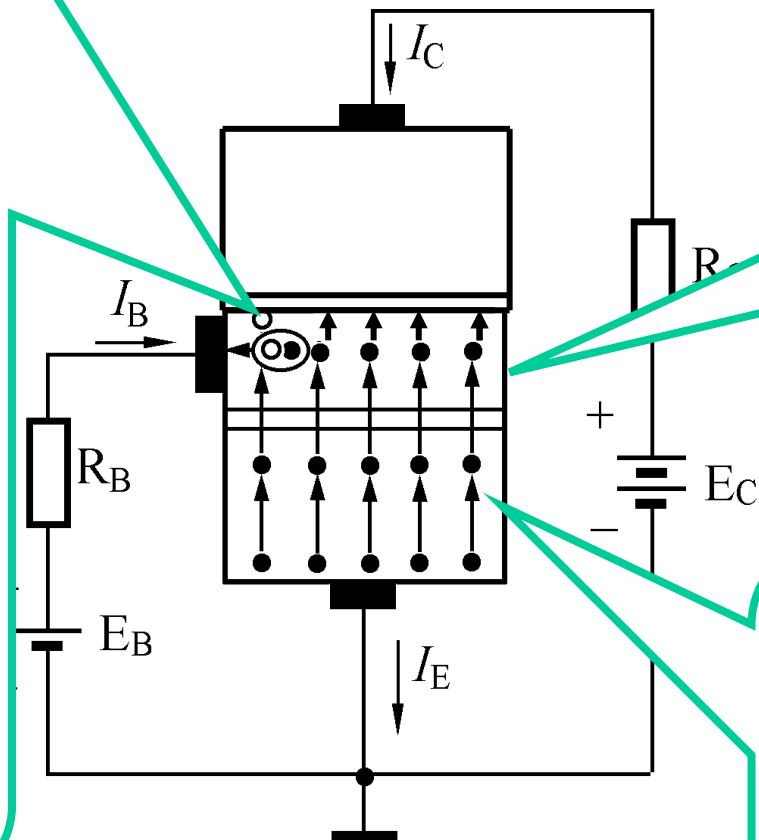
要使晶体管能放大电流，发射结必须正偏，集电结必须反偏。

发射结必须正偏，集电结必须反偏。



## 载流子运动规律解释放大原理：

进入P区的自由电子的很小部分与基区的空穴复合掉。在 $E_B$ 的作用下，基区的价电子不断的被拉出来，补充复合掉的空穴，形成基极电流 $I_B$ 。

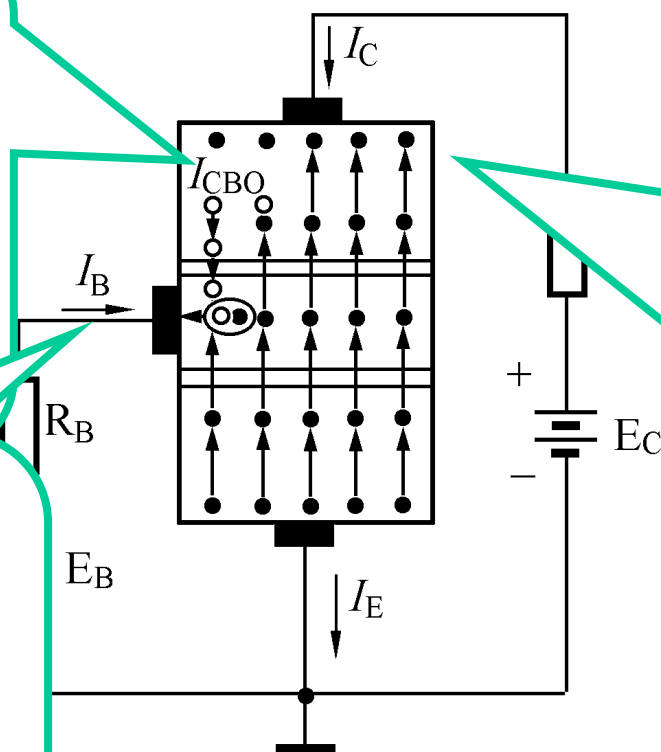


多数自由电子继续向集电结扩散。

发射结正偏，发射区的自由电子不断向基区扩散，形成发射极电流 $I_E$ 。

集电结反偏，少子空穴向基区飘移，形成反向电流  $I_{CBO}$ 。

由于集电区的空穴数  $\ll$  基区的空穴数，所以基极电流主要是多子空穴与电子复合产生的。



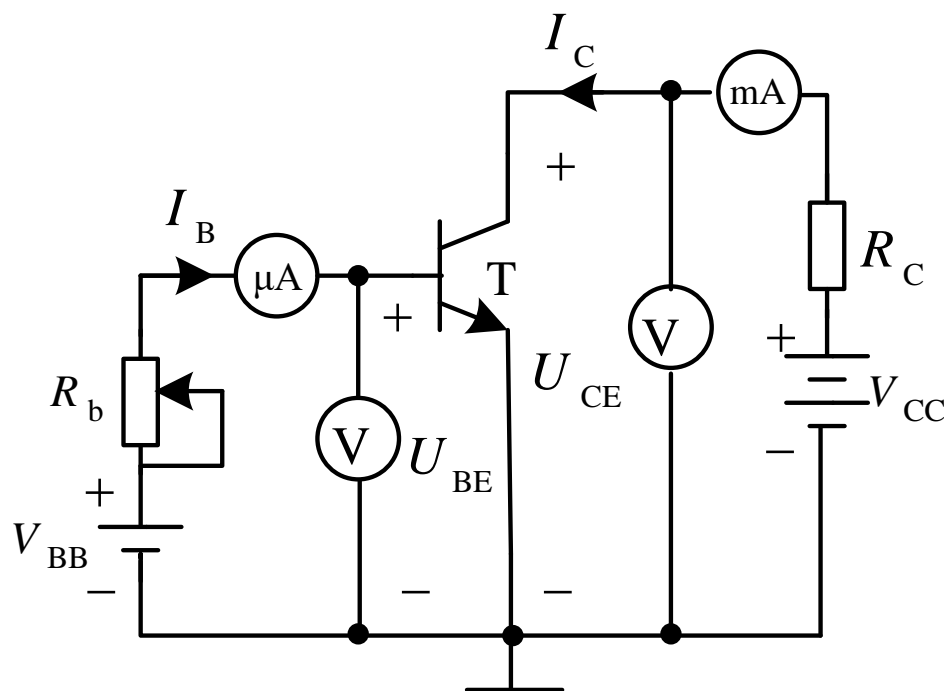
由于集电结反偏，从基区扩散来的自由电子穿过集电结而被收集，形成集电极电流  $I_C$ 。

结论:  $I_C = \beta I_B$



### 3.特性曲线

实验电路：



(1) 输入特性

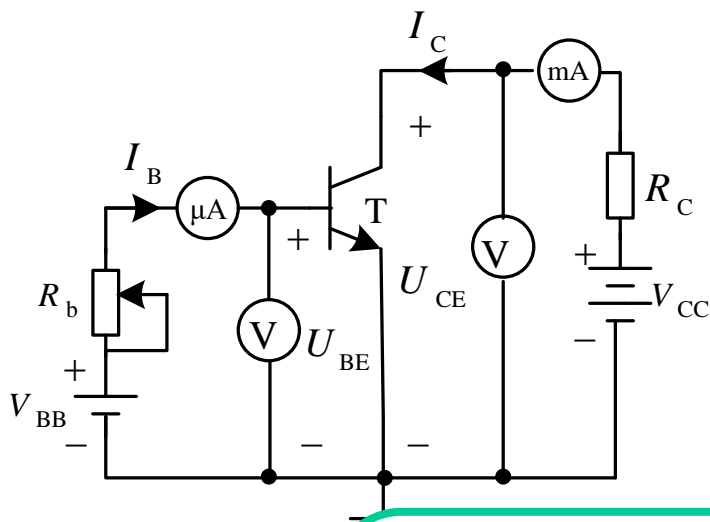
$$I_B = f(U_{BE})$$

(2) 输出特性

$$I_C = f(U_{CE})$$

## (1) 输入特性

$$I_B = f(U_{BE}) \quad U_{CE} = \text{常数}$$



硅管工作压降:

$$U_{BE} \approx 0.6 \sim 0.7 \text{V},$$

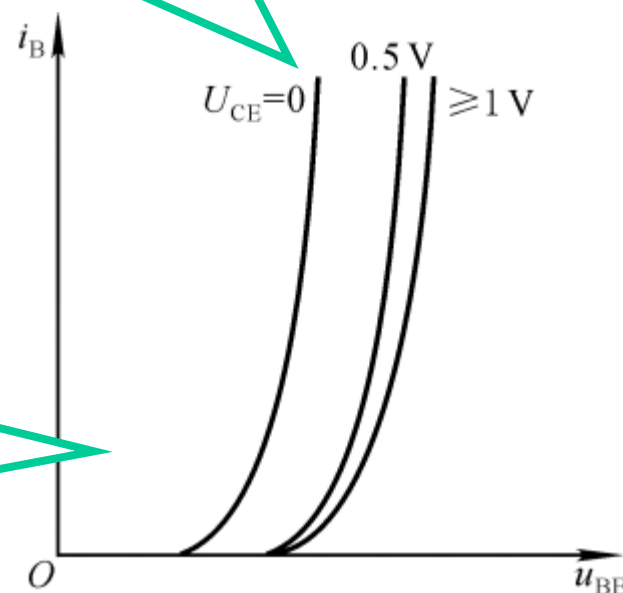
锗管工作压降:

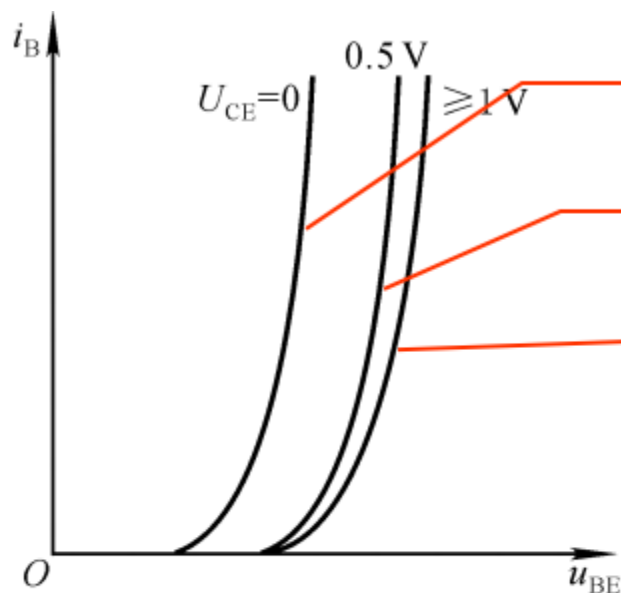
$$U_{BE} \approx 0.2 \sim 0.3 \text{V}.$$

死区电压,

硅管0.5V,

锗管0.1V。



$U_{CE}$ 不同值时的曲线变化

为什么像PN结的伏安特性？

为什么 $U_{CE}$ 增大曲线右移？

为什么 $U_{CE}$ 增大到一定值曲线右移就不明显了？

对于小功率晶体管， $U_{CE}$ 大于1V的一条输入特性曲线可以取代 $U_{CE}$ 大于1V的所有输入特性曲线。

曲线右移的原因是：

$U_{CE} \uparrow \rightarrow$  基区复合的电子少  $\rightarrow$  若使 $i_B$ 不变  $\rightarrow u_{BE} \uparrow \rightarrow$  多发射电子。

饱和时,  $U_{CES} = 0.2 \sim 0.3V$ (硅管),  $I_B > I_{BS}$ 。

## (2) 输出特性曲线 $I_C = f(U_{CE})$

饱和区:

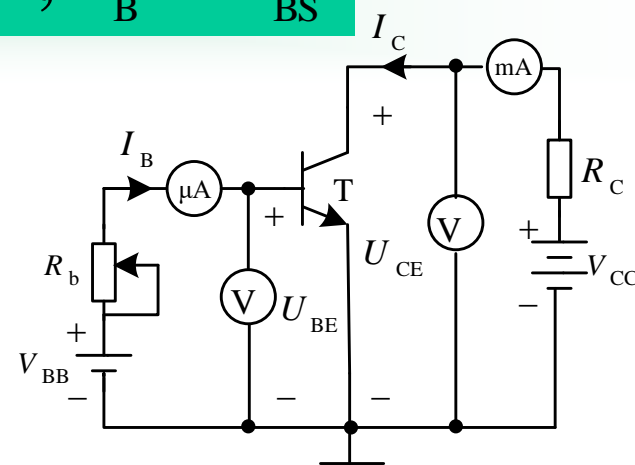
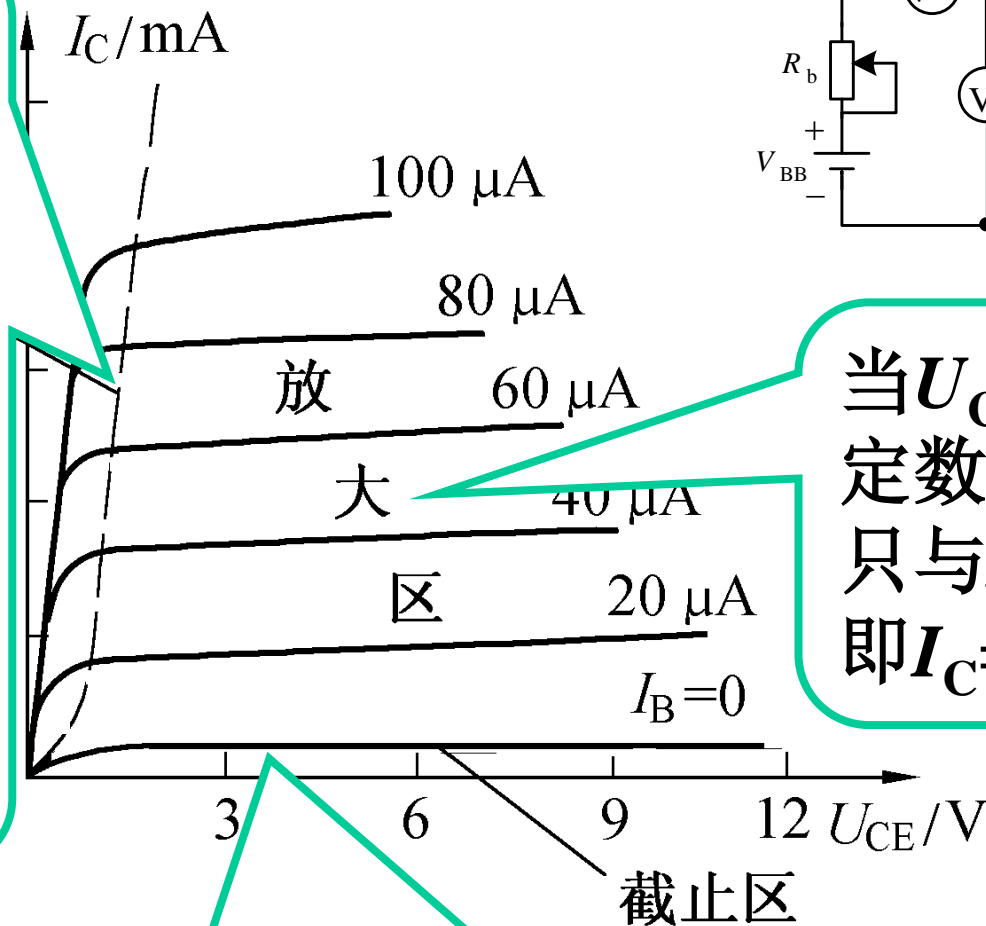
$U_{CE} < U_{BE}$ ,  
集电结正偏,

$\beta I_B > I_C$ 。

临界状态:

$U_{CE} = U_{BE}$

$U_{CB} = 0$



当  $U_{CE}$  大于一定数值时,  $I_C$  只与  $I_B$  有关, 即  $I_C = \beta I_B$ 。

$U_{BE} < 0$ ,  $I_B = 0$ ,  $I_C \leq I_{CEO} \approx 0$

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

$I_{CEO}?$

## 4.主要参数

### (1) 电流放大倍数 $\beta$

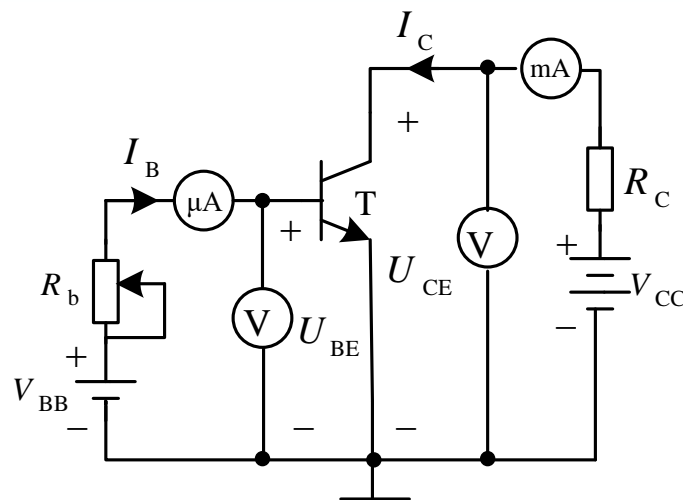
共射接法的放大电路，

直流电流放大倍数为

$$\overline{\beta} = \frac{I_C - I_{CEO}}{I_B} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

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

在计算中，一般作近似处理： $\beta = \overline{\beta}$



交流电流放大倍数为

例如  $U_{CE} = 6V$  时,  $I_B = 40\mu A$ ,  $I_C = 1.5mA$  ;  
 $I_B = 60\mu A$ ,  $I_C = 2.3mA$ 。

$$\overline{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5$$

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = 40$$

在计算中, 一般作近似处理, 即

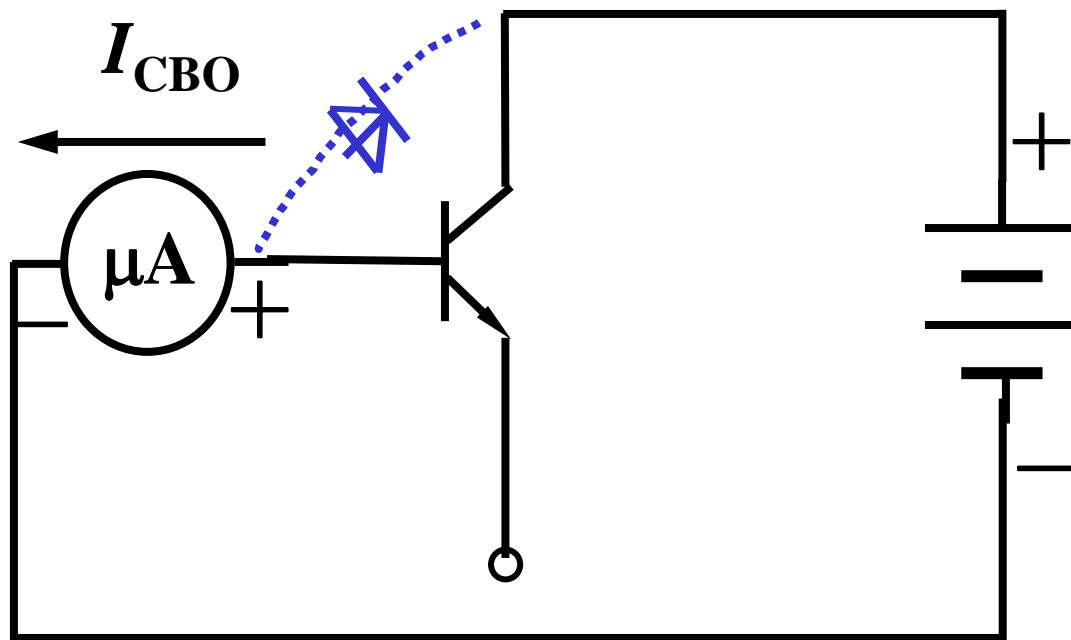
$$\beta = \overline{\beta}$$

共基接法的放大电路：

$$\overline{a} = \frac{I_{\text{CN}}}{I_{\text{E}}} \quad a = \frac{\Delta i_{\text{C}}}{\Delta i_{\text{E}}} \quad \overline{a} \approx a \approx 1$$

没有电流放大作用

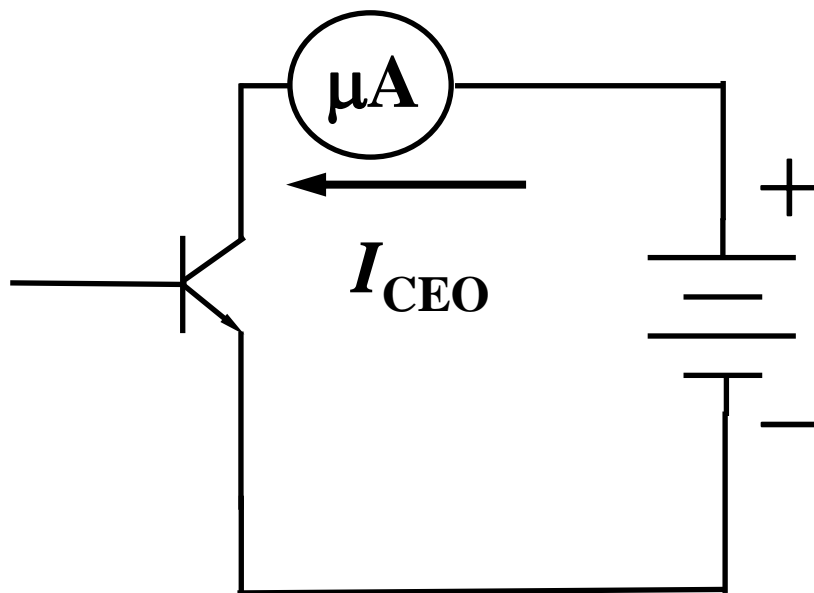
## (2) 集-基极反向截止电流 $I_{CBO}$



$I_{CBO}$  是集电结反偏时，由少子的漂移形成的反向饱和电流，其值受温度变化的影响。



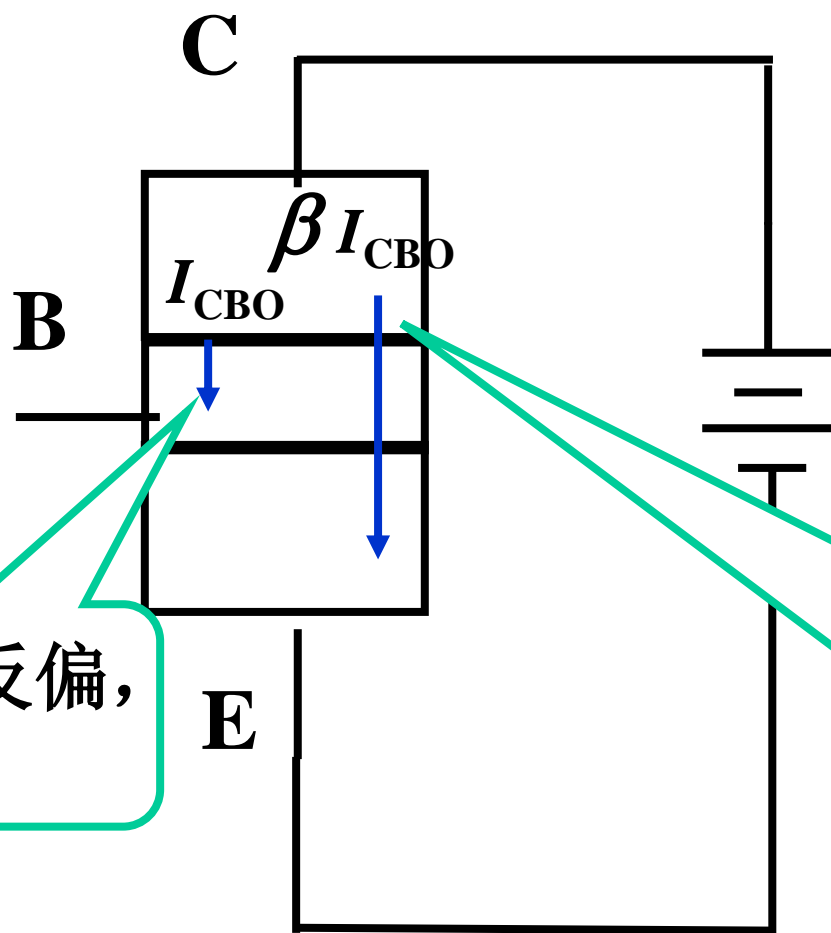
### (3) 集-射极穿透电流 $I_{\text{CEO}}$



$I_{\text{CEO}}$  是基极开路时，由集电极流入发射极的电流（少数载流子），其值受温度变化的影响。

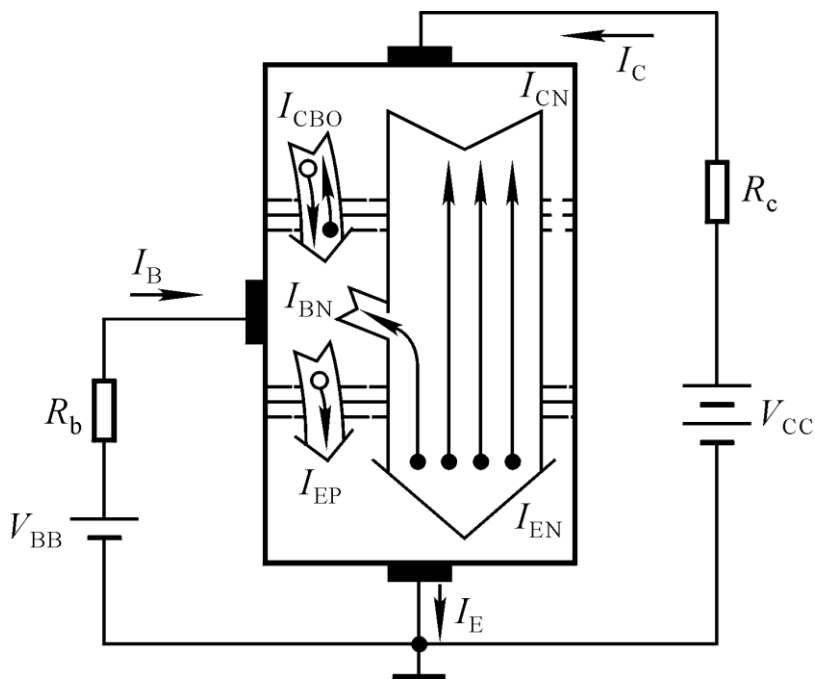
$$I_{\text{CEO}} = \beta I_{\text{CBO}} + I_{\text{CBO}} = (1 + \beta) I_{\text{CBO}}$$

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



集电结反偏，  
有  $I_{\text{CBO}}$ 。

根据放大关系，由于有  $I_{\text{CBO}}$  的存在必有电流  $\beta I_{\text{CBO}}$ 。



$$I_E = I_{EN} + I_{EP} = I_{CN} + I_{BN} + I_{EP}$$

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

$$I_B = I_{BN} + I_{EP} - I_{CBO} = I'_B - I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I'_B} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

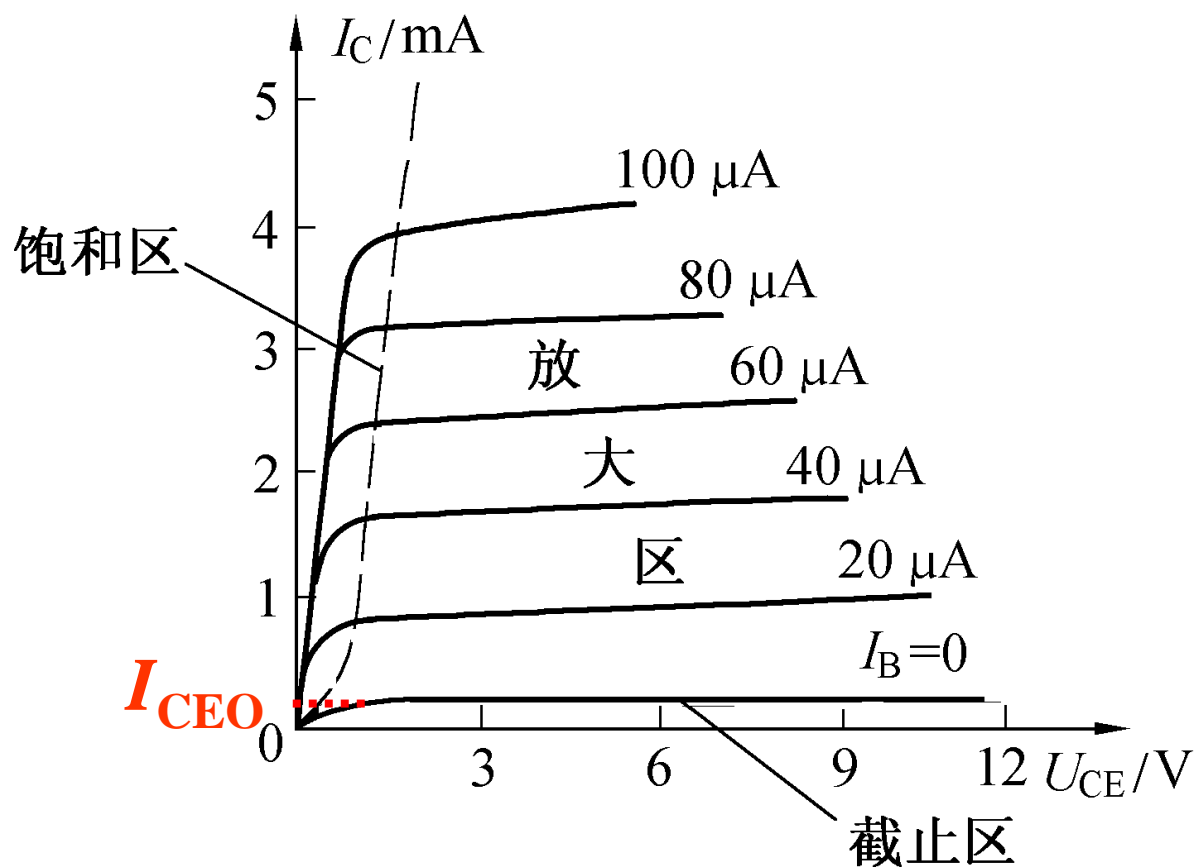
整理得

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

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

实际上，晶体管工作在放大区时，

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



#### (4) 集电极最大电流 $I_{CM}$

集电极电流 $I_C$ 上升会导致晶体管的 $\beta$ 值下降，当 $\beta$ 值下降到正常值的三分之二时的集电极电流即为 $I_{CM}$ 。

#### (5) 集—射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

当基极开路时，允许加在集—射极之间的最大电压，即为 $U_{(BR)CEO}$ 。当 $U_{CE}$ 超过此值时，晶体管就会击穿。

其数量级为几十伏以上。

## (6) 集电极最大允许功耗 $P_{CM}$

集电极电流 $I_C$ 流过晶体管，所消耗的功率为

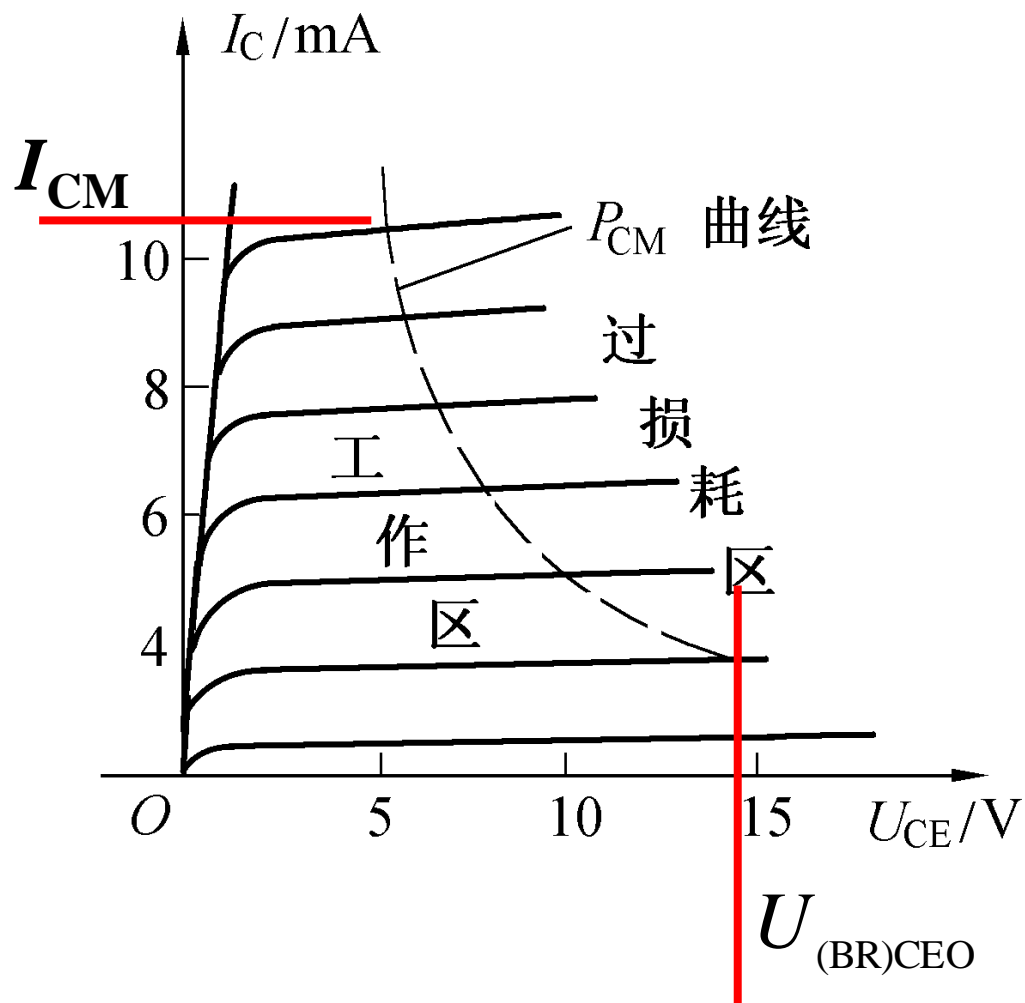
$$P_C = I_C U_{CE}$$

其后果必定导致结温上升，当硅管的温度大于150度、锗硅管的温度大于70度时，管子特性变坏，甚至烧坏，所以要限制 $P_C$ 。

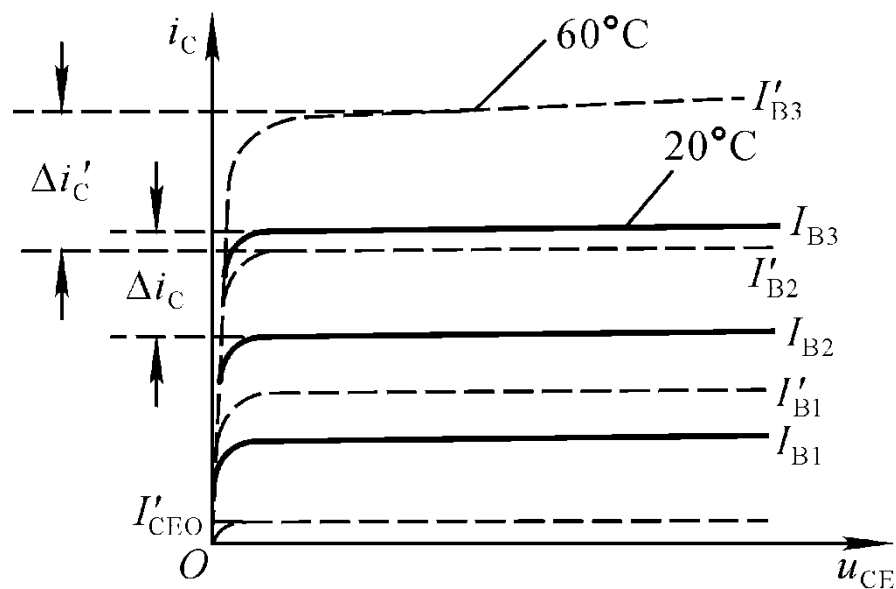
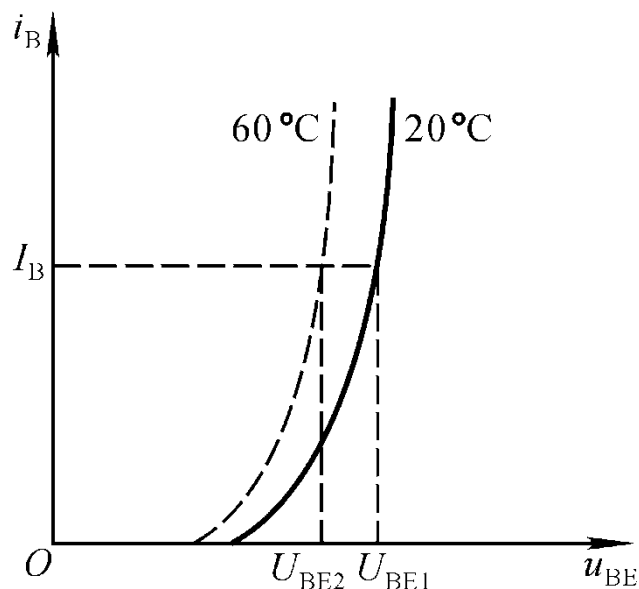
正常工作时，

$$P_C \leq P_{CM}$$

## 晶体管正常工作的区域



## 5. 温度对晶体管特性的影响



$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{\text{CEO}} \uparrow$$

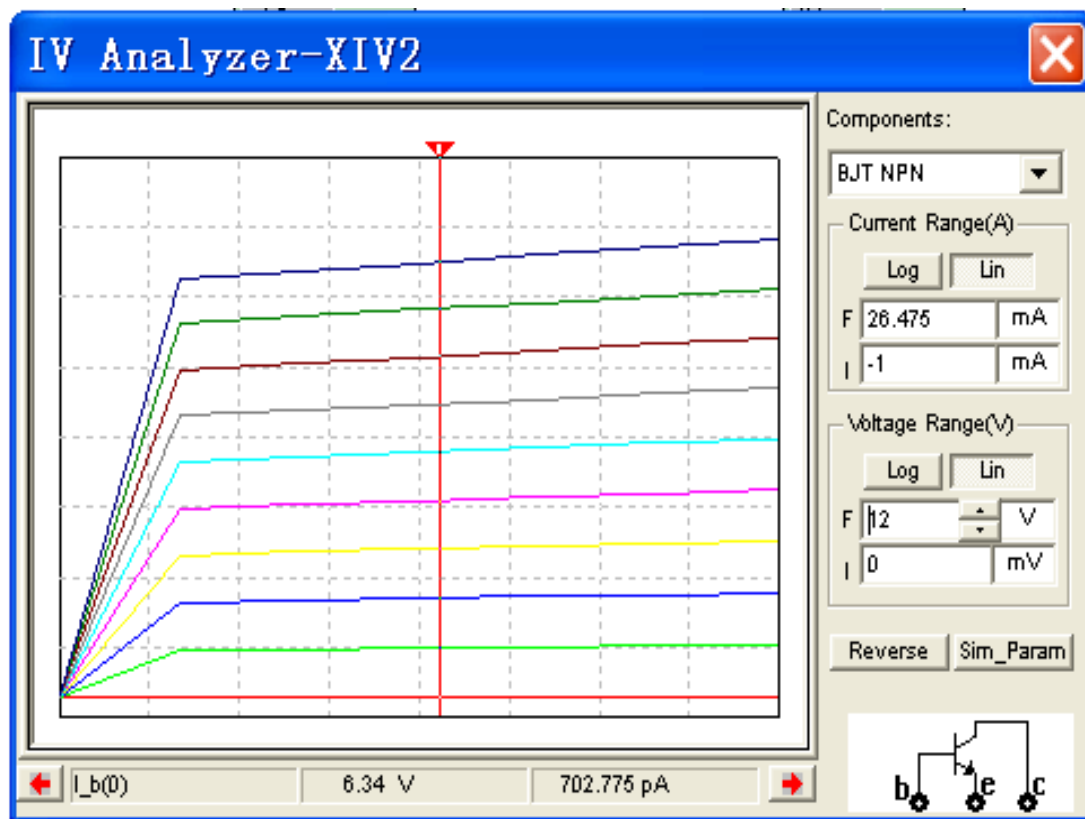
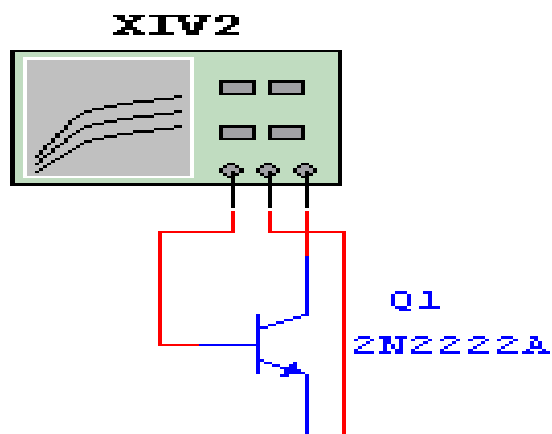
$$\rightarrow \beta \uparrow$$

其结果使  $I_C \uparrow$

$\rightarrow u_{BE}$  不变时  $i_B \uparrow$ , 即  $i_B$  不变时  $u_{BE} \downarrow$



# 1.利用Multisim测试晶体管的输出特性



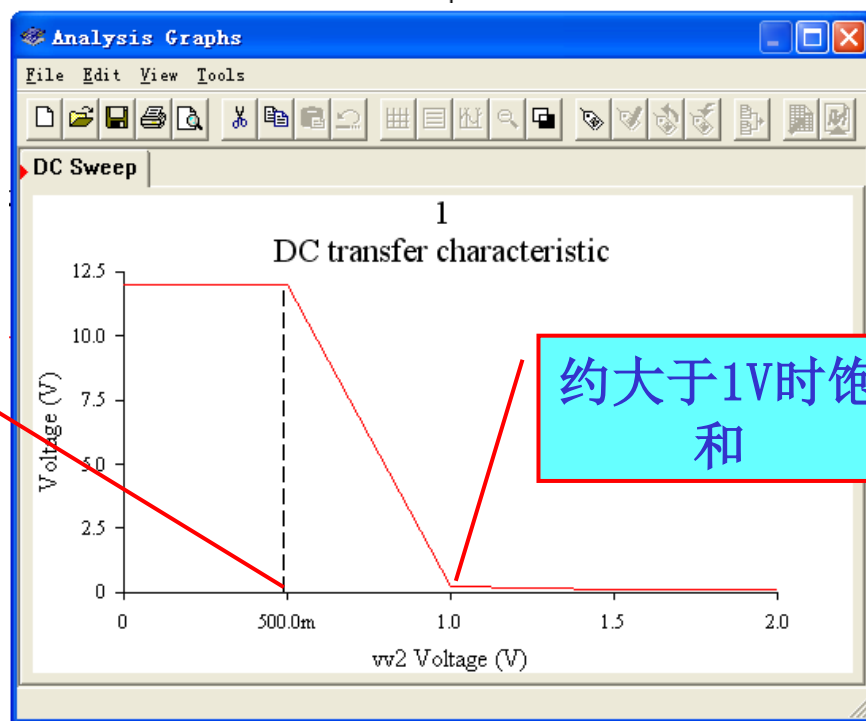
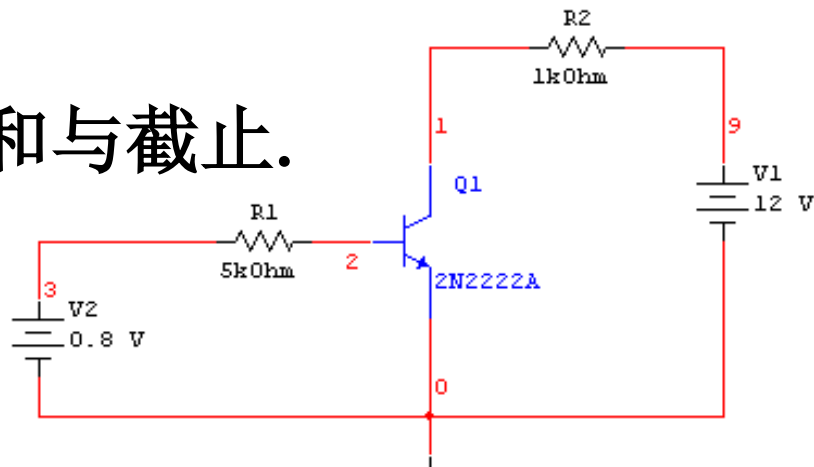
## 2. 用电压传输特性观察饱和与截止.

- 利用Multisim分析图  
示电路在V2小于何值  
时晶体管截止、大于  
何值时晶体管饱和。

以V2作为输入、以节点1作为输出，采用直流扫描的方法可得！

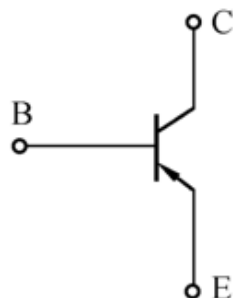
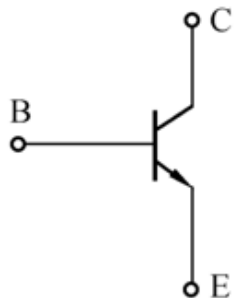
约小于0.5V时  
截止

描述输入电压与输出电压之间的函数关系，称为电压传输特性。



## 小结

1. 晶体管工作状态有三种：放大、饱和、截止。



2. 三种工作的条件：

(1) 放大条件：发射结正偏，集电结反偏。

对于NPN管， $U_{CE} > U_{BE}$ ，即 $V_C > V_B > V_E$ ；

对于PNP管， $V_E > V_B > V_C$

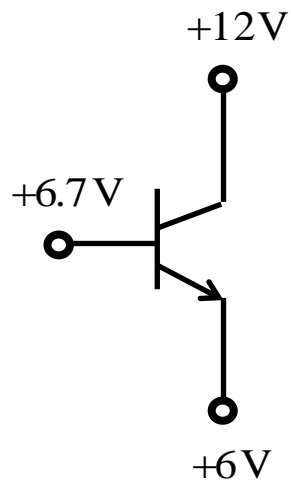
(2) 饱和条件：发射结正偏，集电结正偏。

对于NPN管， $U_{BE} > U_{CE}$ ，即 $V_B > V_C > V_E$

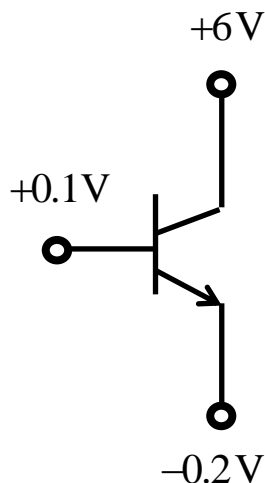
(3) 截止条件：发射结反偏，集电结正偏。

对于NPN管， $U_{BE} < 0$

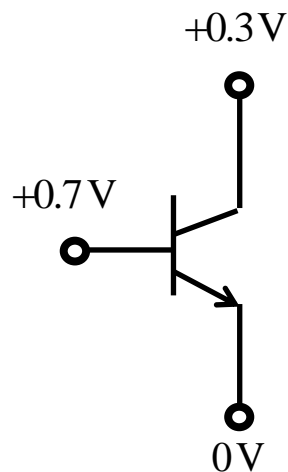
【例1.4.1】判断各图中晶体管的工作状态。



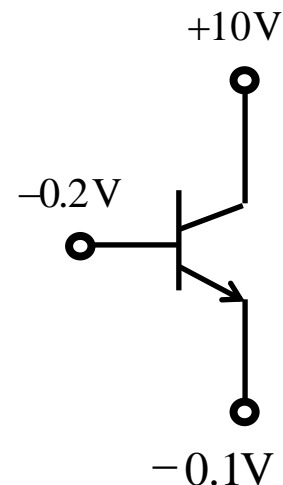
(a)



(b)



(c)



(d)

【解】

(a) 放大状态（硅管）

(b) 放大状态（锗管）

(c) 饱和状态（硅管）

(d) 截止状态（锗或硅管）

$$T_3\text{管: } U_{BE3} = V_{B3} - V_{E3} = -0.7 + 0.5 = -0.2V$$

$$U_{BE3} < 0, \quad T_3\text{管工作在截止状态。}$$

$$(3) \quad V_{C3} = 3V, \quad V_{B3} = -0.7V, \quad V_{E3} = -0.5V。$$

试分析各晶体管的工作状态。

【解】根据放大、饱和、截止条件来分析。

$$T_1\text{管: } U_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = 8 - 2.3 = 5.7V,$$

$$U_{BE1} = V_{B1} - V_{E1} = 3 - 2.3 = 0.7V$$

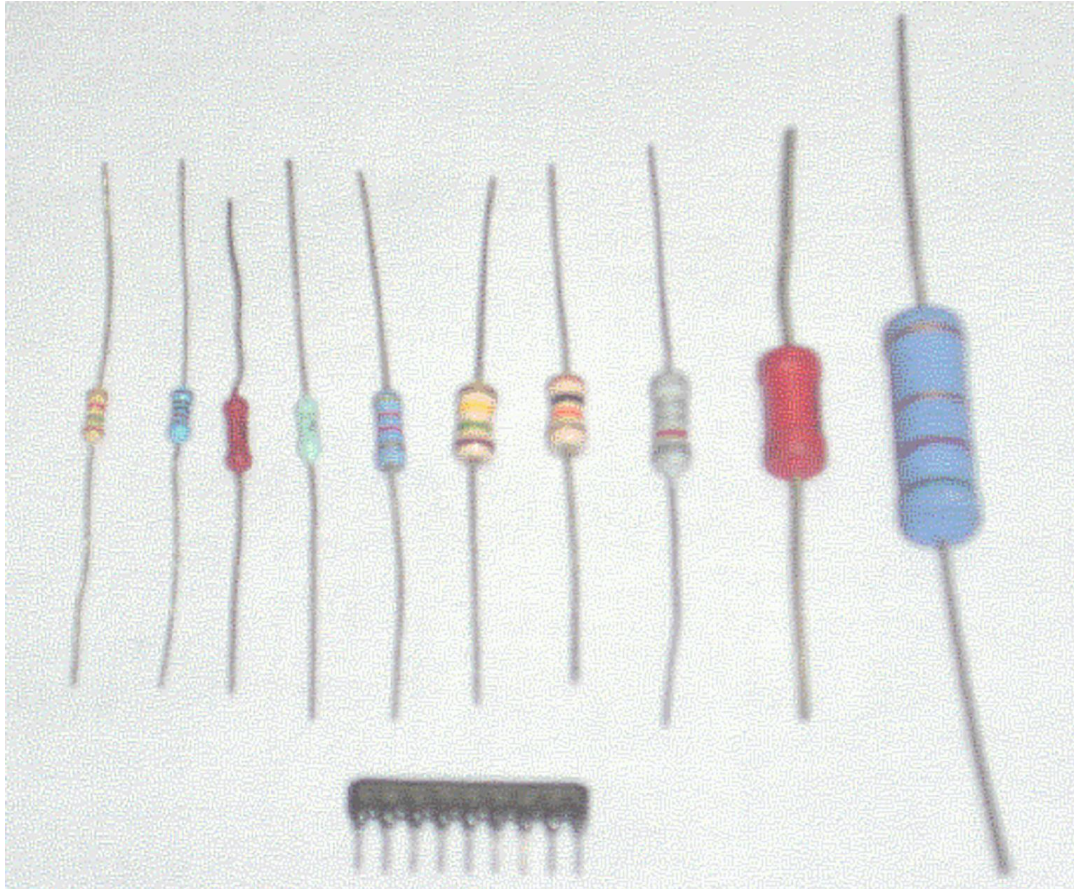
$$U_{CE1} > U_{BE1}, \quad T_1\text{管工作在放大状态。}$$

$$T_2\text{管: } U_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 0.3 - 0 = 0.3V$$

$$U_{BE2} = V_{B2} - V_{E2} = 0.7 - 0 = 0.7V$$

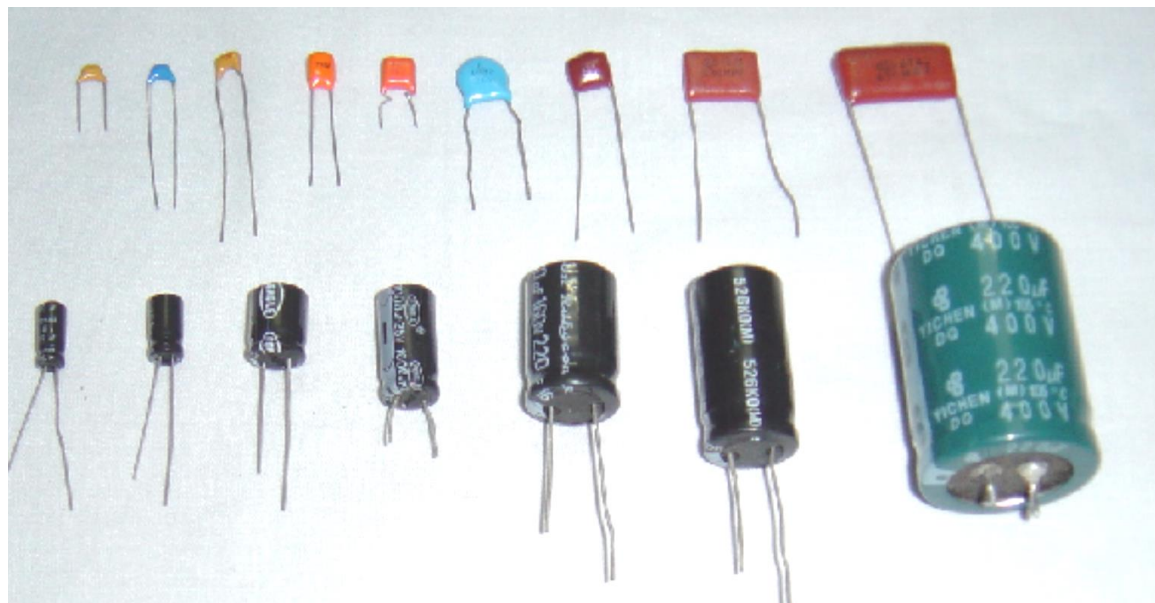
$$U_{CE2} < U_{BE2}, \quad T_2\text{管工作在饱和状态。}$$

## 色环电阻



## 电阻排

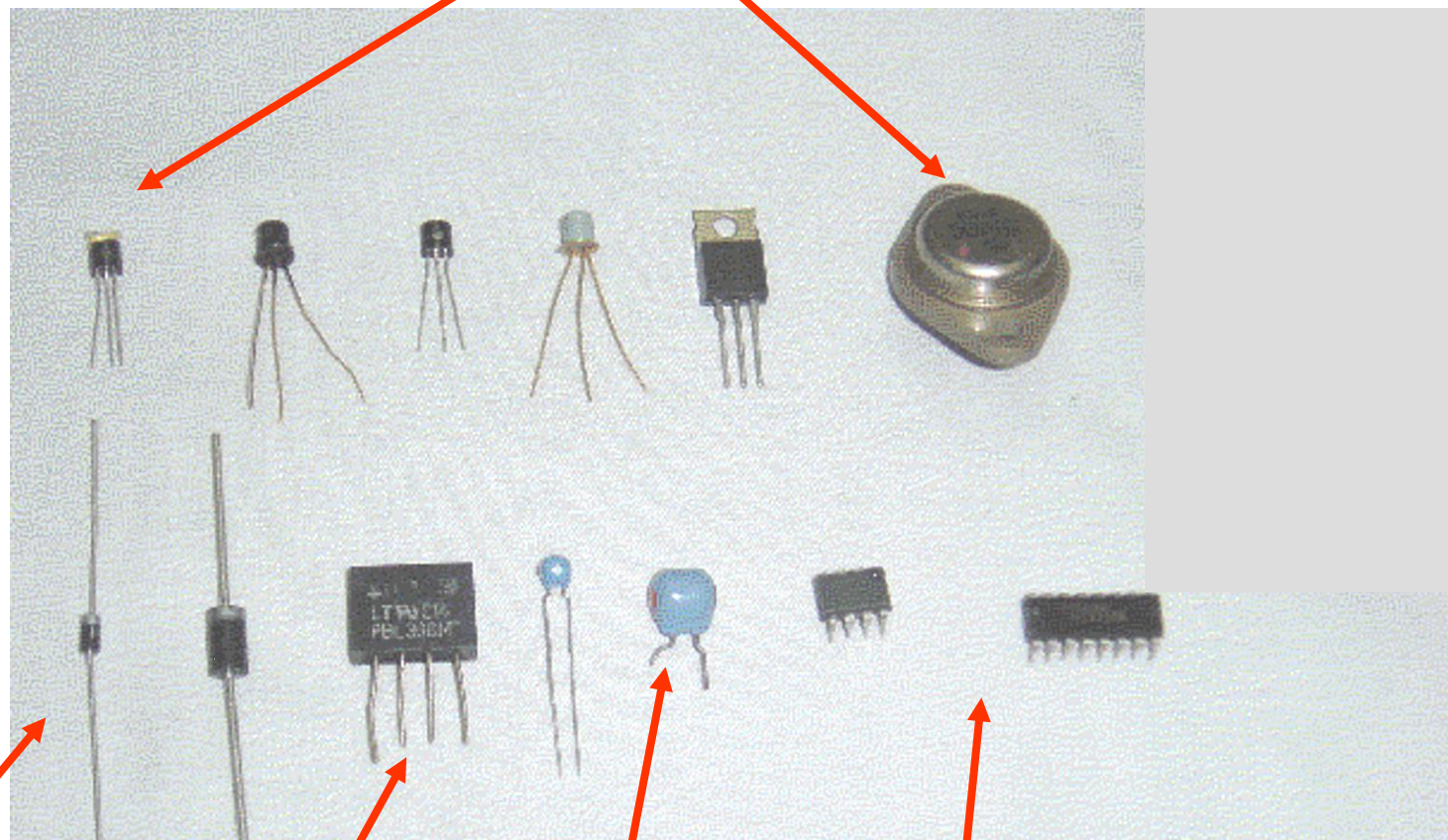
## 电容



## 极性电容



## 晶体管、场效应管



二极管

整流桥、电感、集成电路芯片



# 第1章

# 结 束