



# 第一章 半导体器件

§ 1.1 半导体的导电特性

§ 1.2 半导体二极管

§ 1.3 晶体管

构成电子技术元器件的基础

侧重掌握器件的外部特性

## § 1.1 半导体的导电特性

**导体：**自然界中很容易导电的物质 如金属

**绝缘体：**几乎不导电的物质，  
如橡皮、陶瓷、塑料和石英

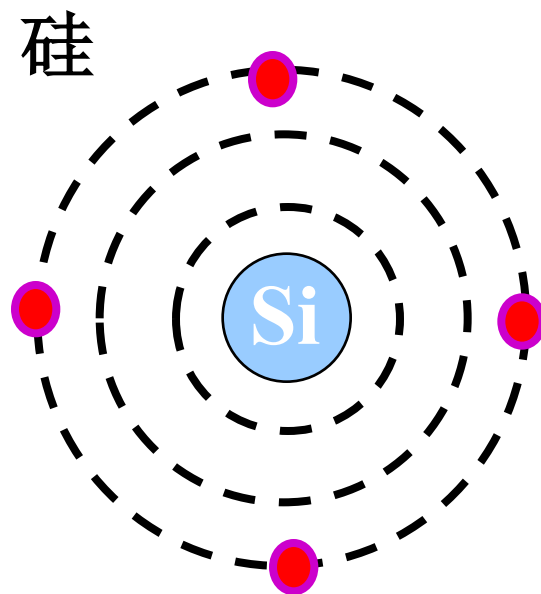
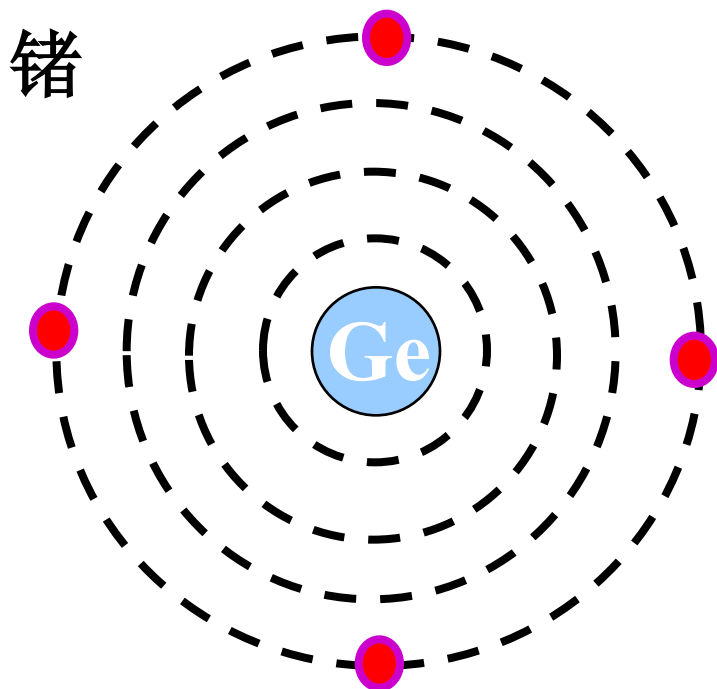
**半导体：**导电特性处于导体和绝缘体之间  
如锗、硅、硒和一些硫化物、氧化物

## § 1.1.1 本征半导体

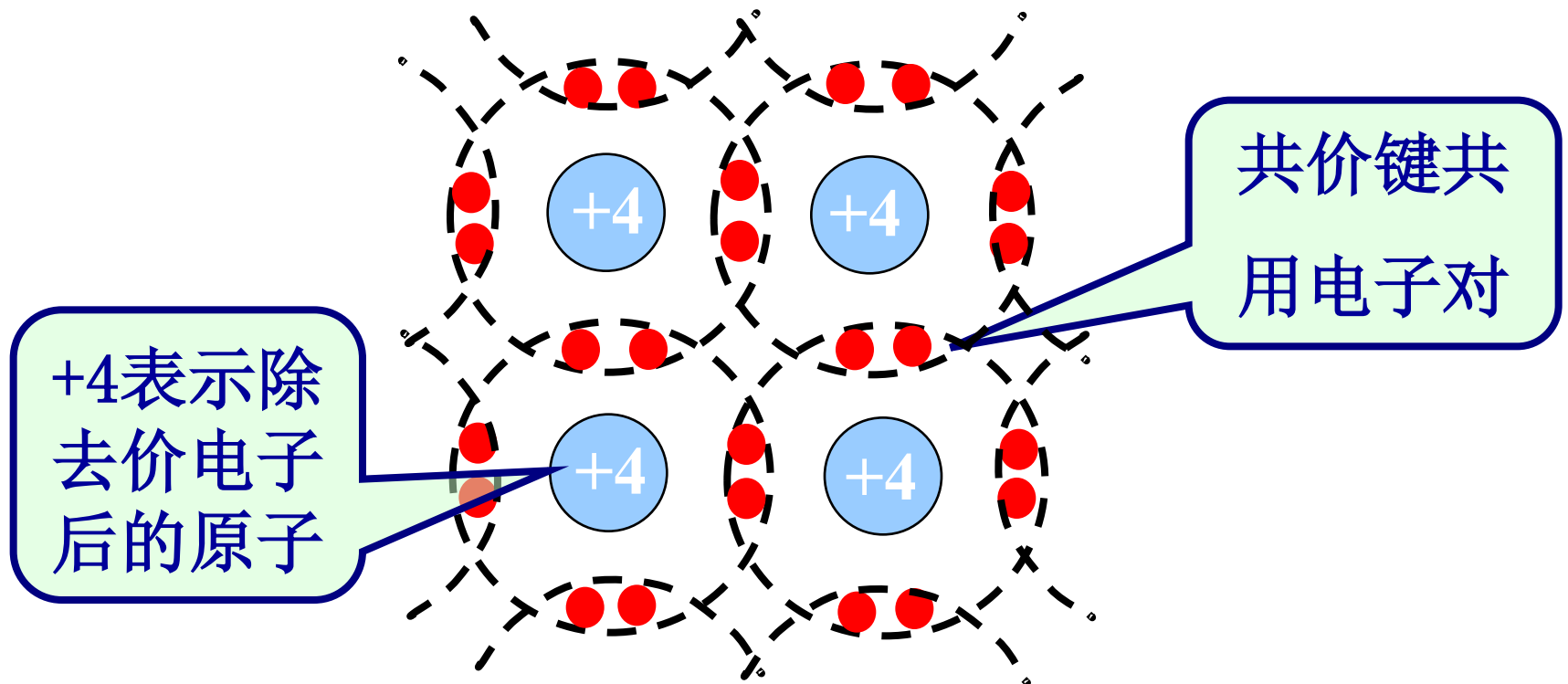
完全纯净的、结构完整的半导体晶体

### 一、本征半导体的结构特点

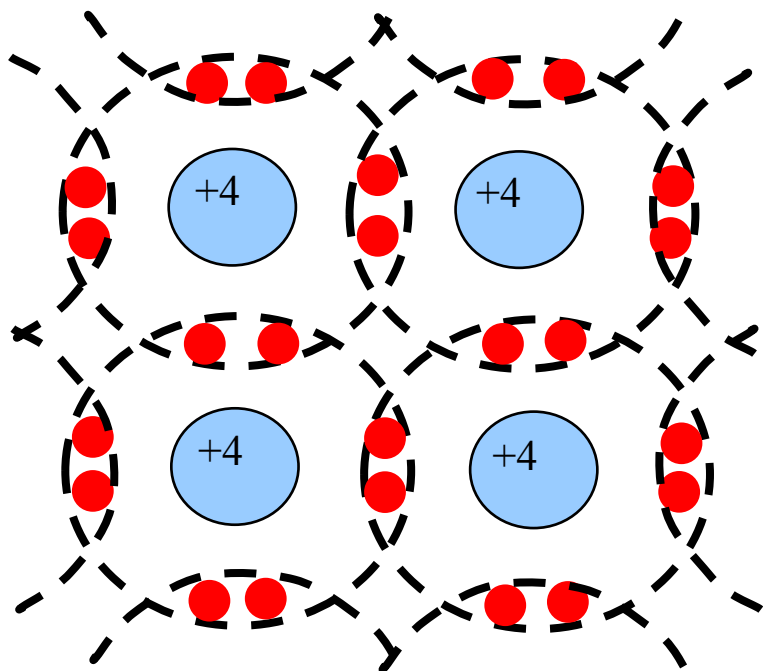
最外层电子（价电子）数：4



## 硅单晶中的共价键结构



## 二、本征半导体的导电机理

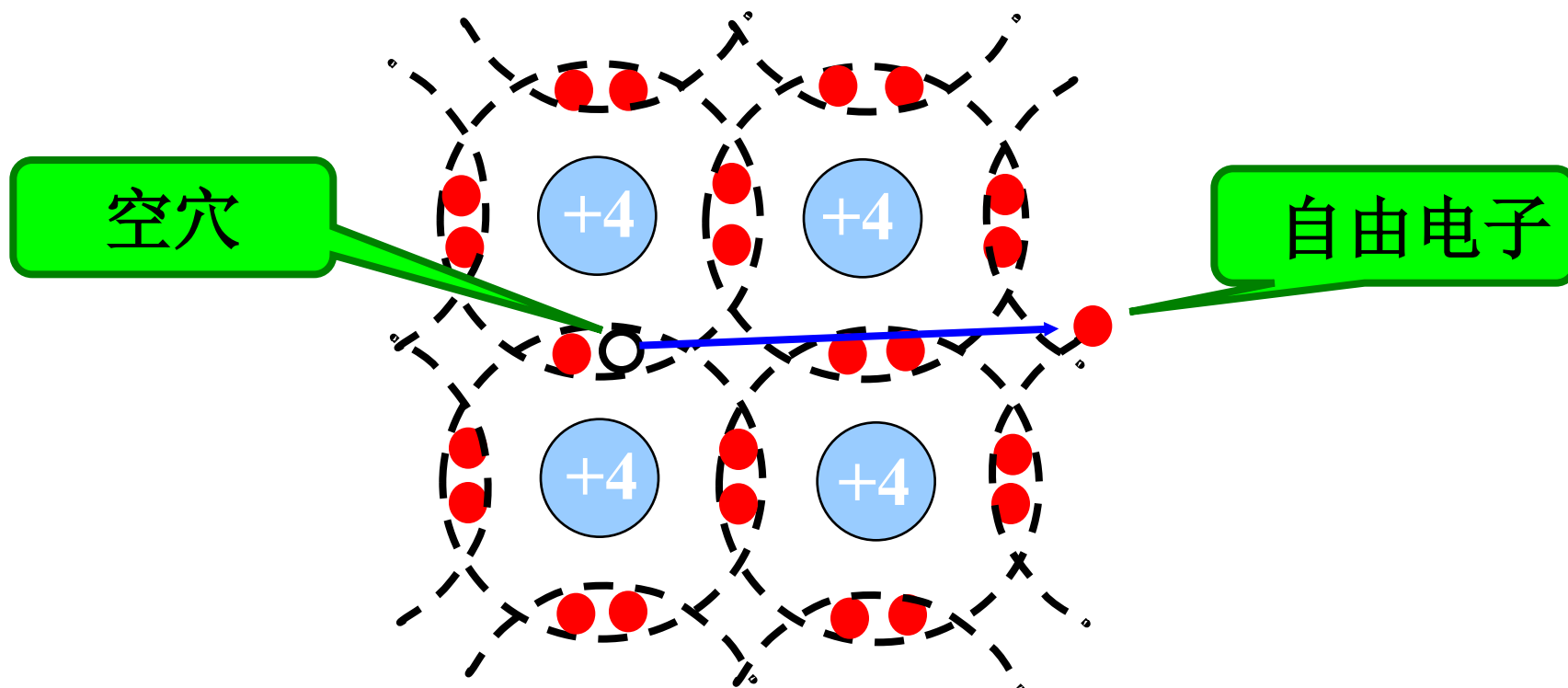


每个原子最外层电子是八个，  
构成稳定的共价键结构

常温下共价键中的电子很难脱  
离原子核的束缚成为自由电子

在绝对0度且没有外界激发时，价电子完全被共价键束缚，  
本征半导体中没有可以运动的带电粒子（载流子），导电  
能力为 0，相当于绝缘体。

## 自由电子、空穴成对出现



常温下，热激发使一些价电子获得足够的能量而脱离共价键的束缚，成为自由电子

原共价键上留下一个空位，称为空穴

在其它力的作用下，空穴  
可吸引附近的电子来填补

其结果相当于空穴的迁移

空穴的迁移相当于正电荷  
的移动，所以空穴可以看  
做是带正电荷载流子

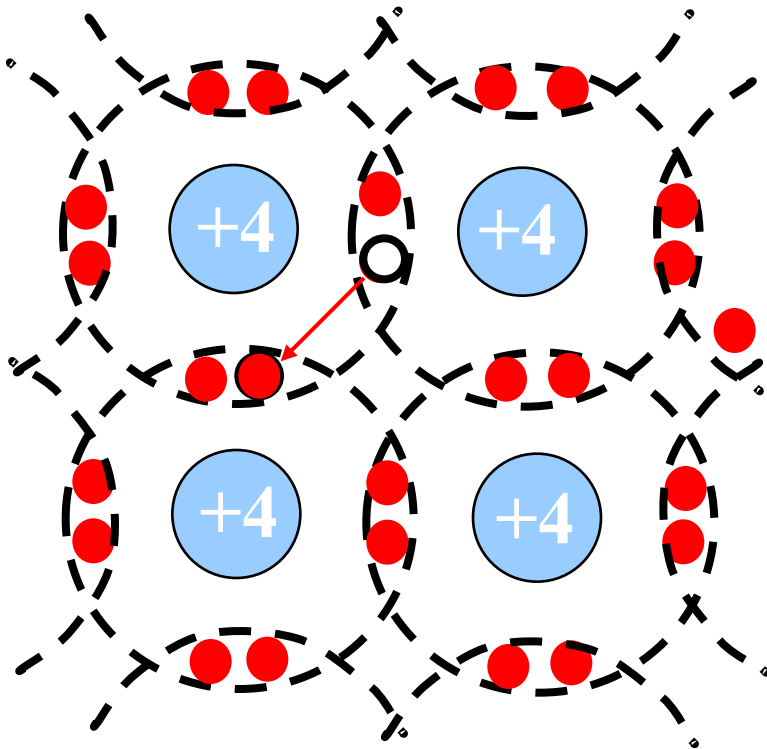
半导体中有两种载流子：

自由电子

空穴

在晶格中运动

在共价键中运动



讨论：半导体的导电能力和哪些因素有关？

半导体的导电能力取决于载流子的浓度

本征半导体的载流子很少，导电能力很弱。

环境温度变化，载流子的浓度变化，

温度是影响半导体性能的重要因素！

受外界热和光的作用时，导电能力明显变化

--- 热敏特性、光敏特性

掺入某些杂质后导电能力会发生明显改变

--- 掺杂特性



什么是影响半导体性能的重要因素？

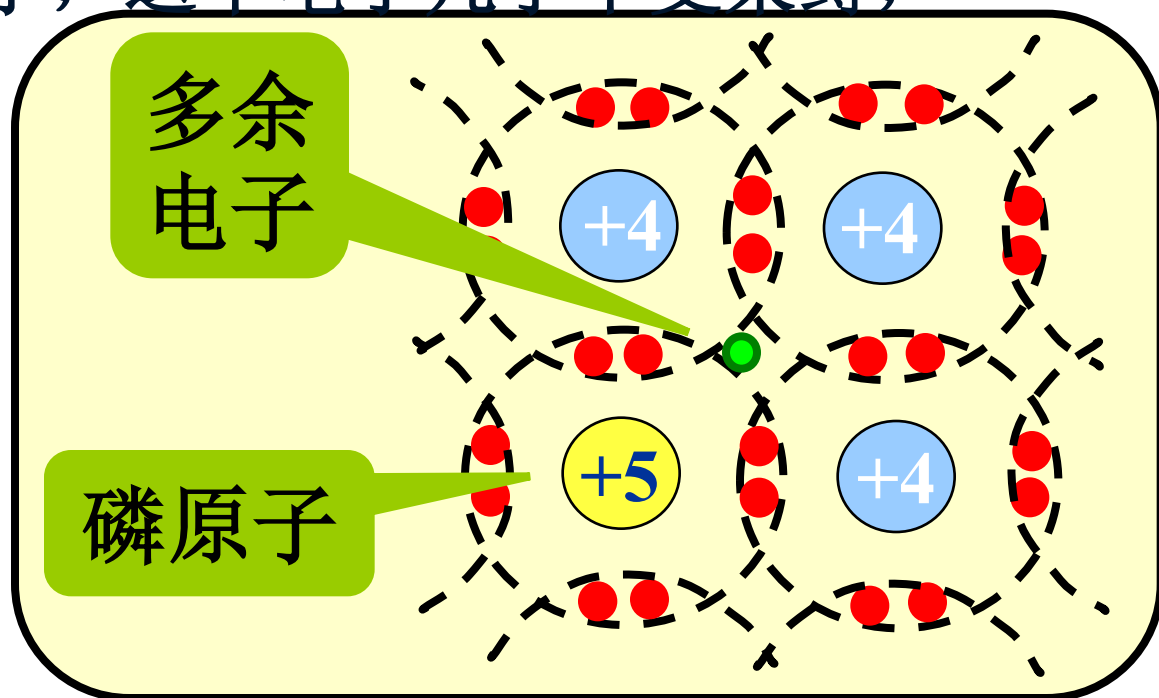
- ☐ A 湿度
- ☒ B 温度
- ☐ C 压强
- ☐ D 光照

提交

## § 1.1.2 N型半导体和P型半导体

### N型半导体

在硅或锗晶体中掺入少量的五价元素磷（或锑），晶体点阵中的某些半导体原子被杂质取代。磷原子的最外层有五个价电子，其中四个与相邻的半导体原子形成共价键，必定多出一个电子，这个电子几乎不受束缚，很容易被激发而成为自由电子。磷原子就成了不能移动的带正电的离子。



# N型半导体中的载流子

1. 本征半导体中成对产生的电子和空穴
2. 由施主原子提供的自由电子，浓度与施主原子相同

因掺杂浓度远大于本征半导体中载流子浓度，所以自由电子浓度远大于空穴浓度。自由电子为多数载流子（多子），空穴为少数载流子（少子）

多子与杂质浓度近似相等，受温度影响较小

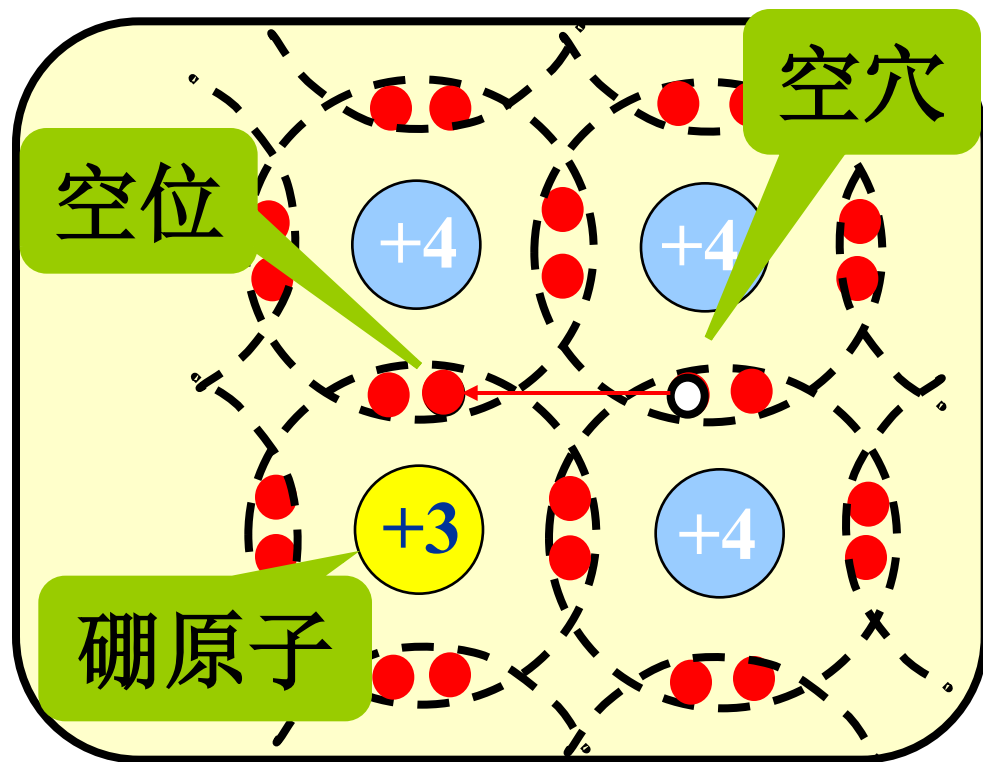
少子与本征激发有关，受温度影响较大

# P 型半导体

在硅或锗晶体中掺入少量三价元素硼（或铟），晶体点阵中的某些半导体硅原子被杂质硼取代。

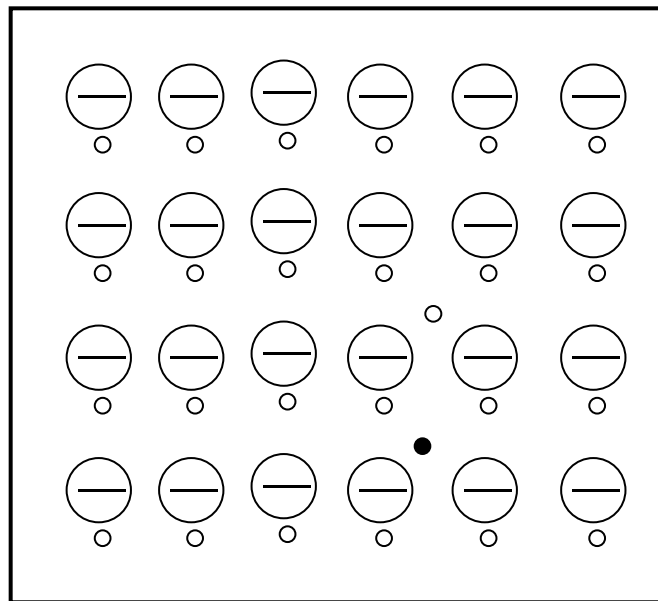
硼原子的最外层有三个价电子，与相邻的半导体原子形成共价键时，产生一个空位。

这个空位可能吸引束缚电子来填补，产生一个空穴。同时，使得硼原子成为不能移动的带负电的离子。

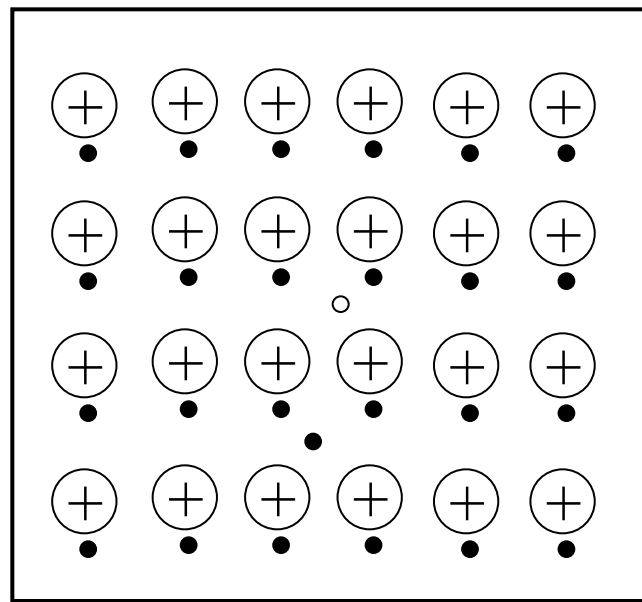


**P 型半导体中空穴是多子，电子是少子**

# 杂质半导体的示意表示法



P 型半导体



N 型半导体

**P 型半导体:**

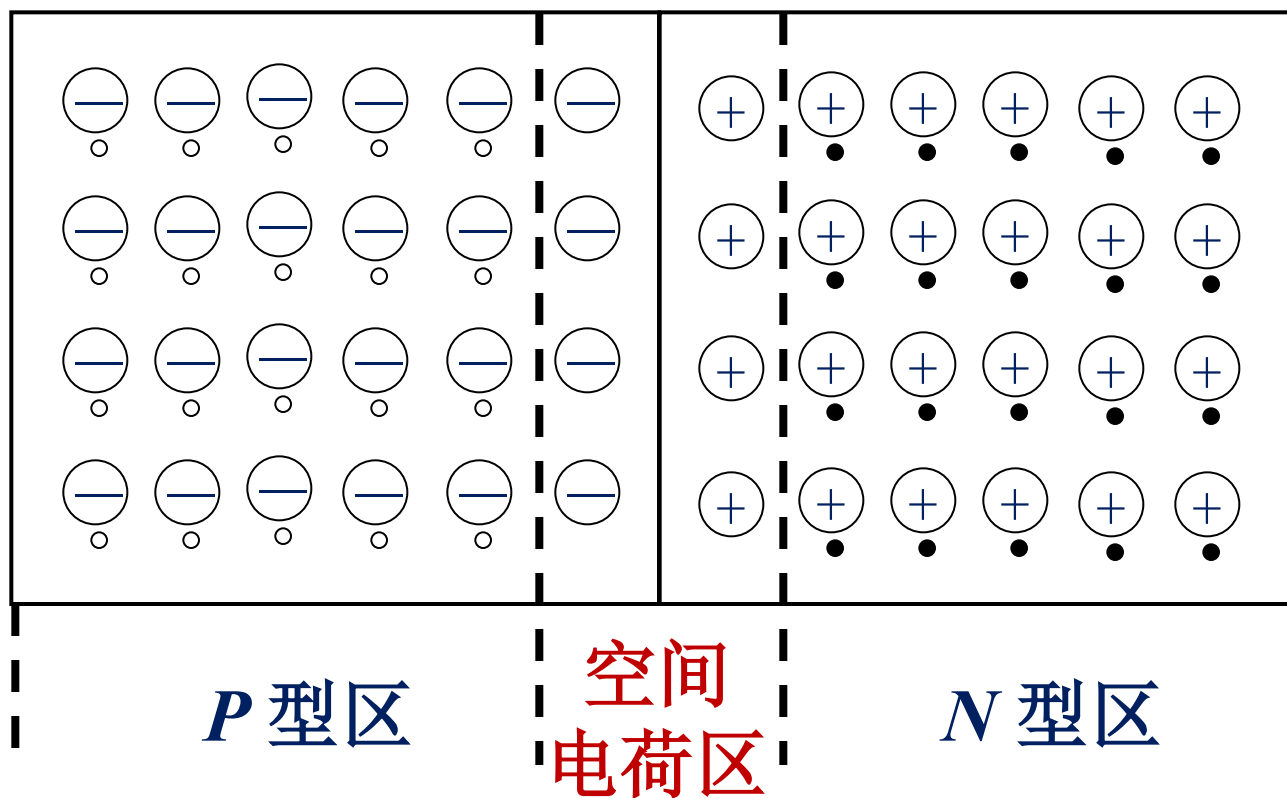
空穴浓度大大增加的杂质半导体，也称**空穴半导体**

**N 型半导体:**

自由电子浓度大大增加的杂质半导体，也**电子半导体**

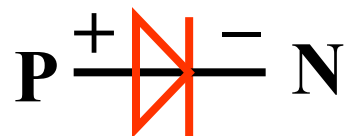
### § 1.1.3 PN 结及其单向导电性

在同一片半导体基片上，分别制造P型区和N型区，由于载流子浓度分布的不均匀性会产生扩散运动，经扩散在交界面处形成空间电荷区，称为**PN结**

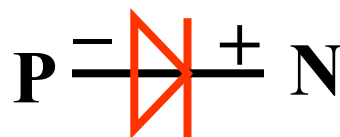


## PN结的单向导电性:

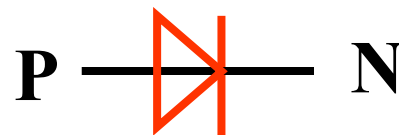
加正向电压时（P正，N负），呈低电阻，正向电流较大，处于导通状态



加反向电压时（P负，N正），呈高电阻，反向电流很小，处于截止状态



下面那种情况下PN结处于正向偏置



- ☒ **A** P正, N负
- ☐ **B** N正, P负
- ☐ **C** 不知道

提交

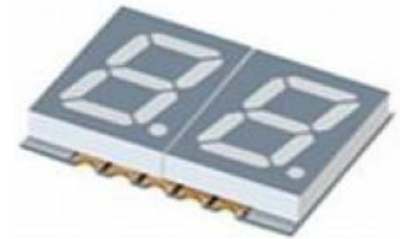


## § 1.2 半导体二极管

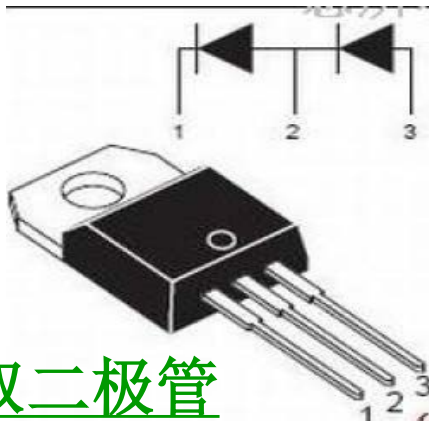
### § 1.2.1 半导体二极管的常见结构



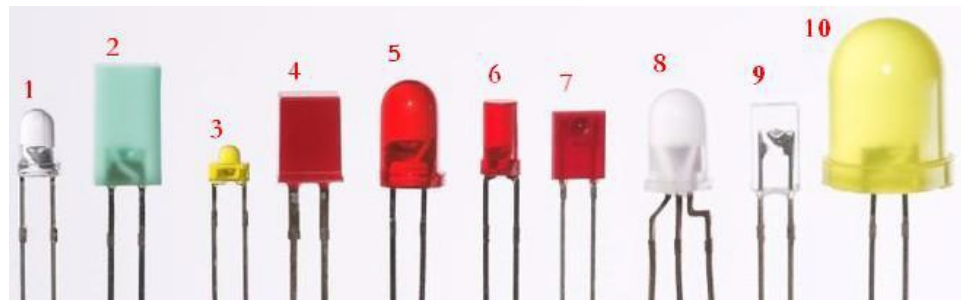
螺栓大电流二极管



数码管



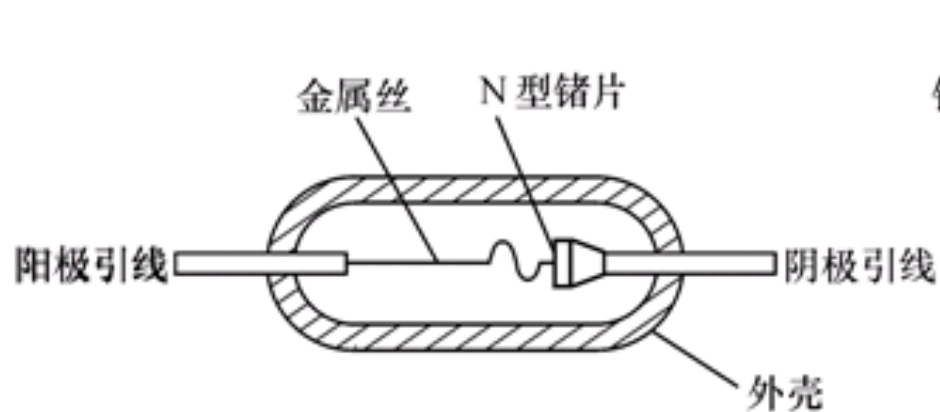
双二极管



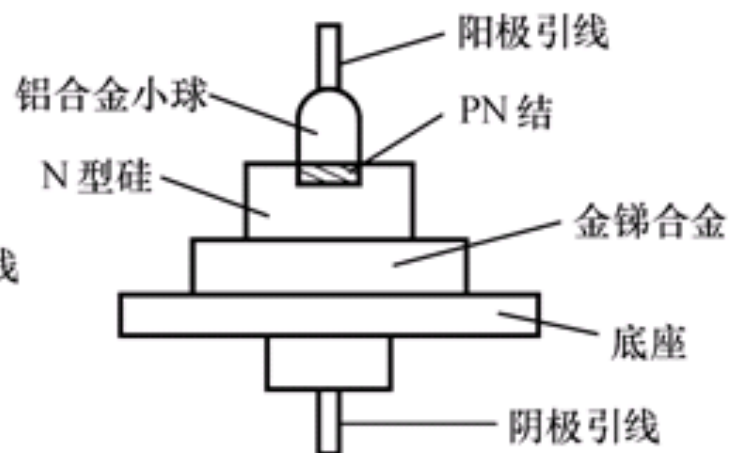
发光二极管



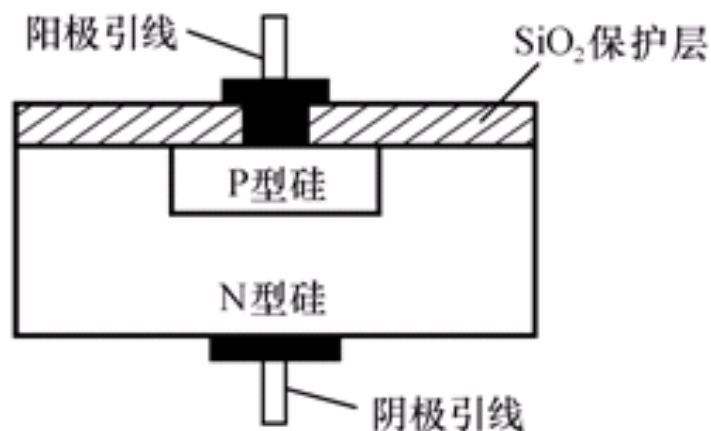
## 基本结构：PN 结加上管壳和引线



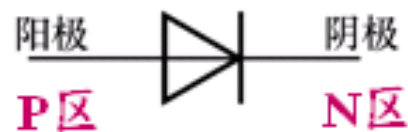
(a) 点接触型



(b) 面接触型



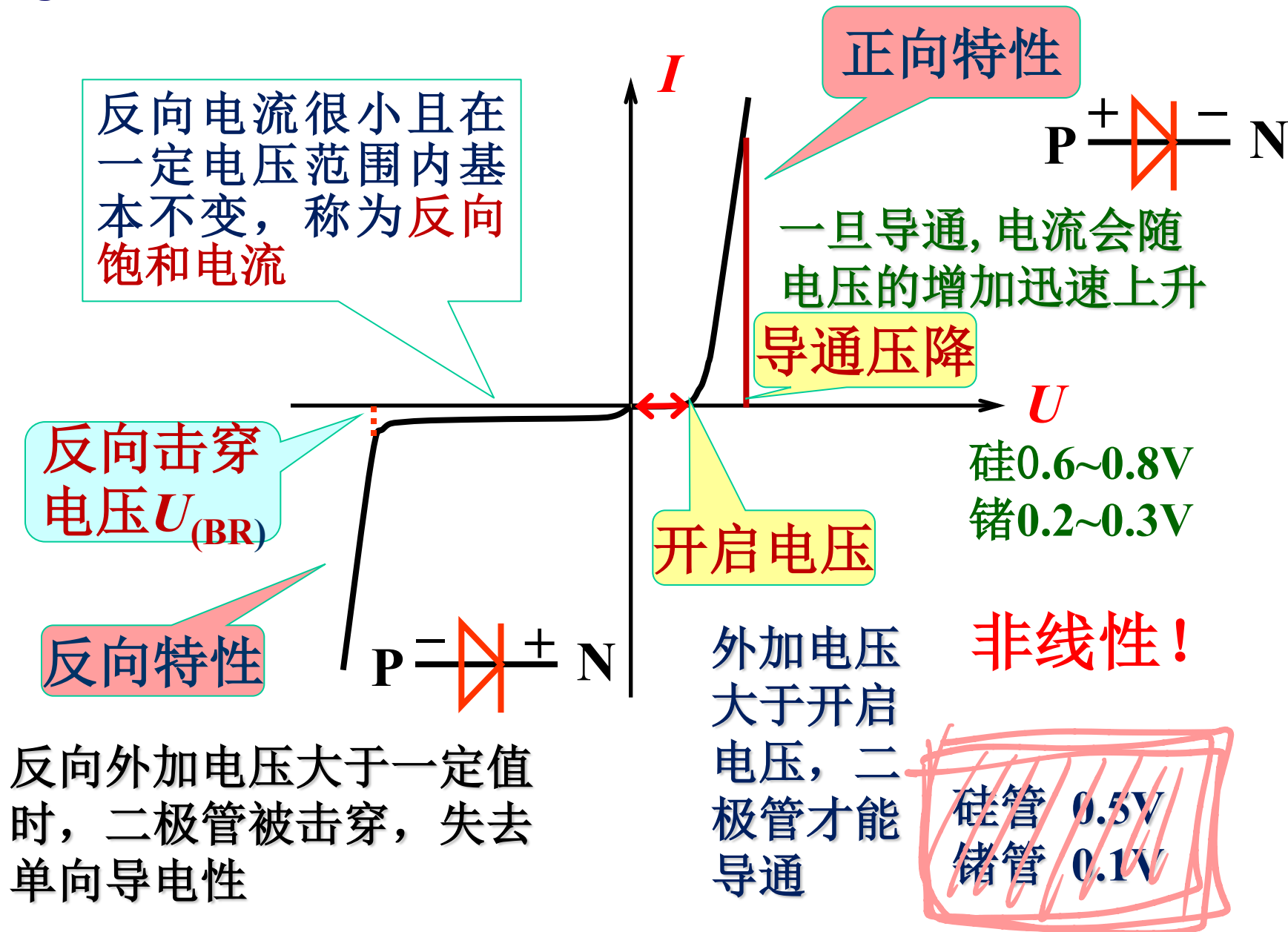
(c) 平面型



符号

(d)

## § 1.2.2 伏安特性及主要参数



## 1. 最大整流电流 $I_{OM}$

二极管长时间使用时允许流过二极管的最大正向平均电流

## 2. 反向工作峰值电压 $U_{RM}$

保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压

一般是反向击穿电压  $U_{(BR)}$  的一半或三分之二

## 3. 反向电流 $I_R$

二极管加反向峰值工作电压时的反向电流

反向电流越大，说明二极管的单向导电性越差

反向电流受温度影响，和材料有关  
硅管较小（<几微安），锗管较大

## § 1.2.3 含二极管电路的分析方法

关键：判二极管工作状态 ---- 导通、截止

判断方法：

1. 断开二极管
2. 分析其两端电位高低

$$\begin{aligned} V_{\text{阳}} > V_{\text{阴}} &\rightarrow \text{导通} \\ V_{\text{阳}} < V_{\text{阴}} &\rightarrow \text{截止} \end{aligned}$$

➤ 理想二极管：正向导通 ---- 管压降为零

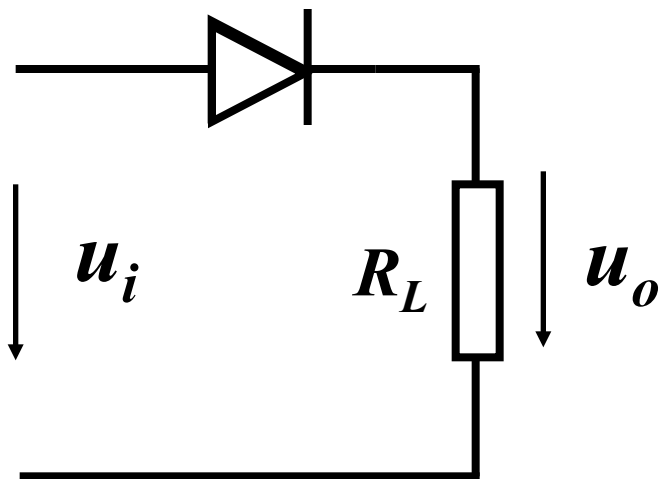
反向截止 ---- 相当于断开

➤ 实际二极管：正向导通 ---- 硅 0.6~0.7V, 锗 0.2~0.3V

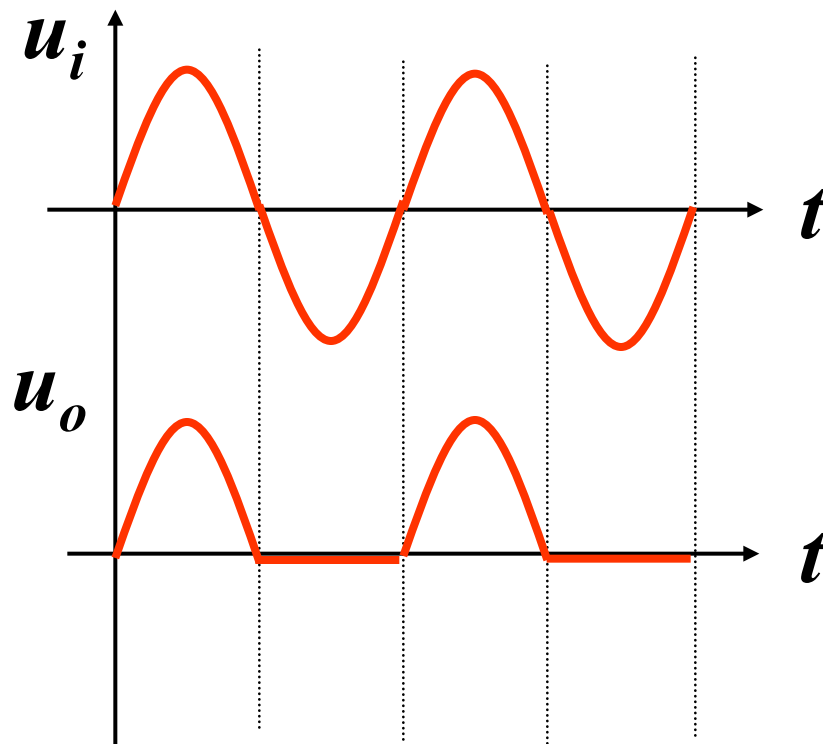
反向截止 ---- 相当于断开

## 二极管电路分析举例：

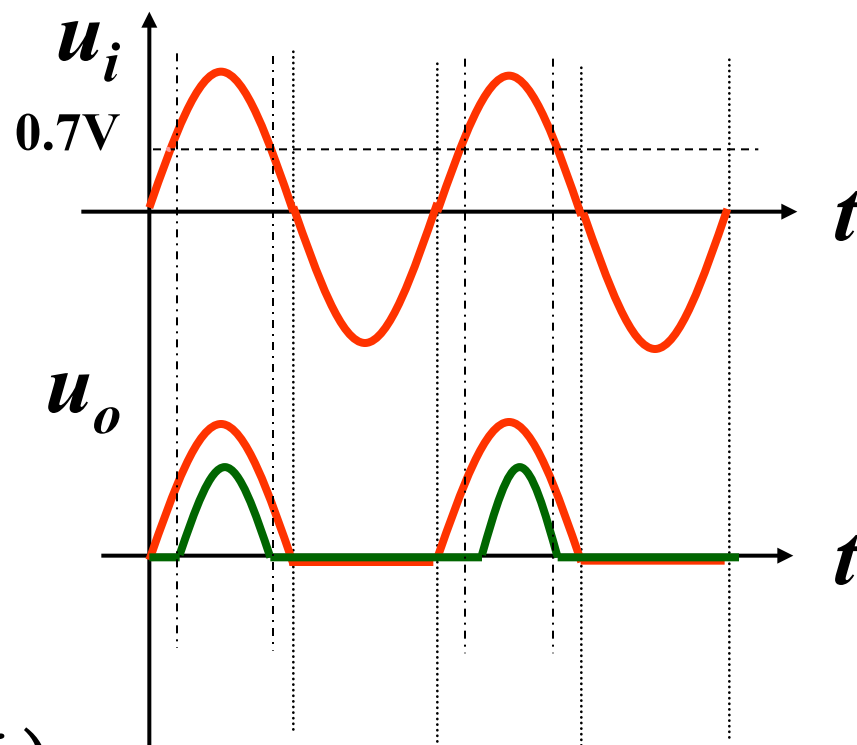
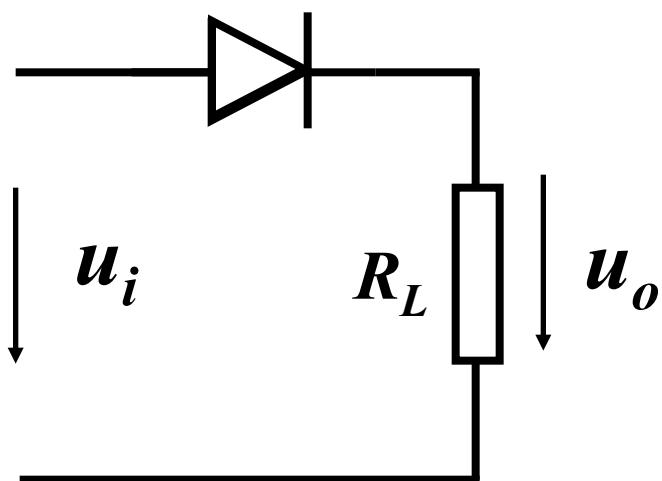
### 半波整流



假定为理想二极管



## 半波整流

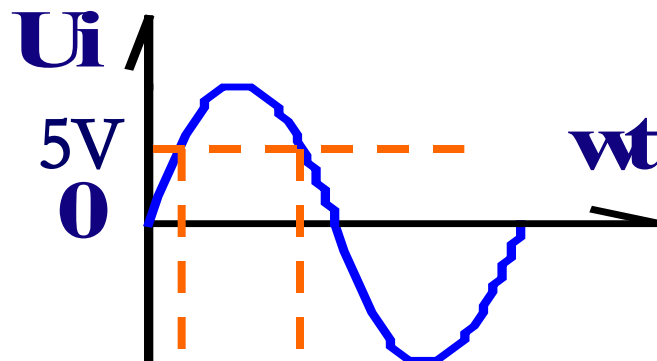
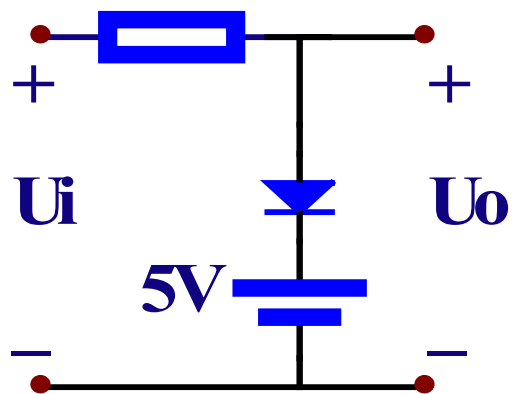


非理想二极管？（硅管）

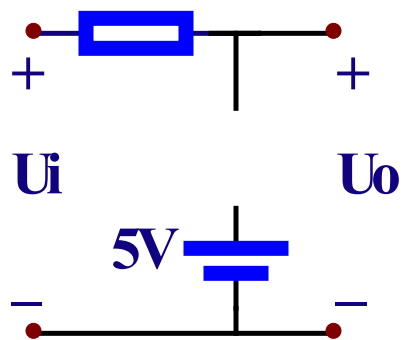
正向管压降 硅  $0.7V$

练习：已知  $U_i = 10 \sin \omega t \text{ V}$ ，二极管为理想元件，试画出  $U_o$  的波形

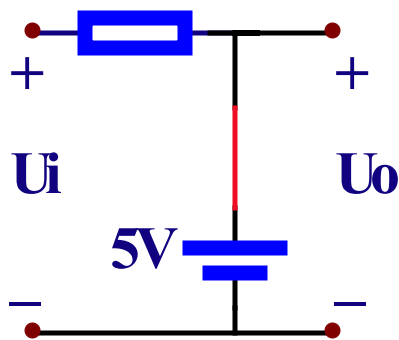
解：



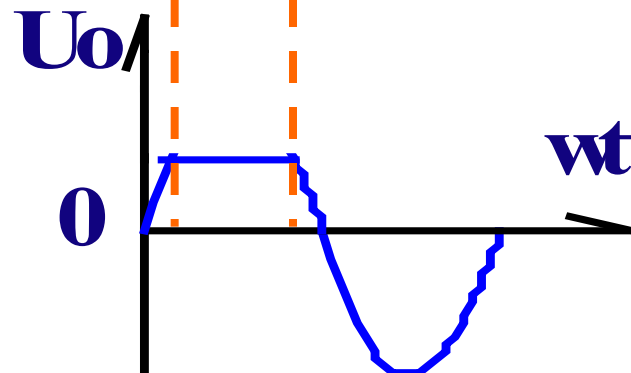
首先判断二极管何时导通、截止



$$U_i < 5\text{V}: U_o = U_i$$



$$U_i > 5\text{V}: U_o = 5\text{V}$$





# 含多个二极管电路的分析

例：已知管子为锗管， $V_a = 3V$ ， $V_b = 0V$ ，求 $V_y = ?$

解：先判二极管是否导通

假设二极管不通， $V_y = -12V$

因 $V_a, V_b$ 均大于 $-12V$ ，至少会有一个导通

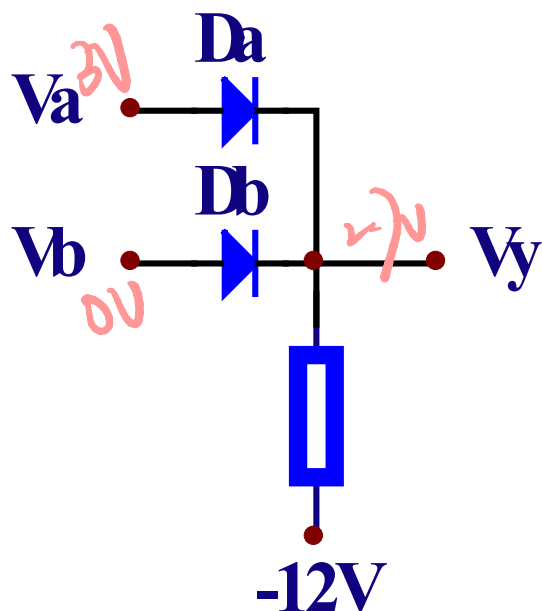
多个二极管时，压差大者优先导通！

因： $V_a > V_b$

故： $D_a$ 优先导通

锗管导通压降为 $0.3V$

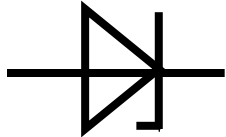
则： $V_y = 2.7V$ ， $D_b$ 截止



## § 1.2.4 稳压二极管

伏安特性

符号



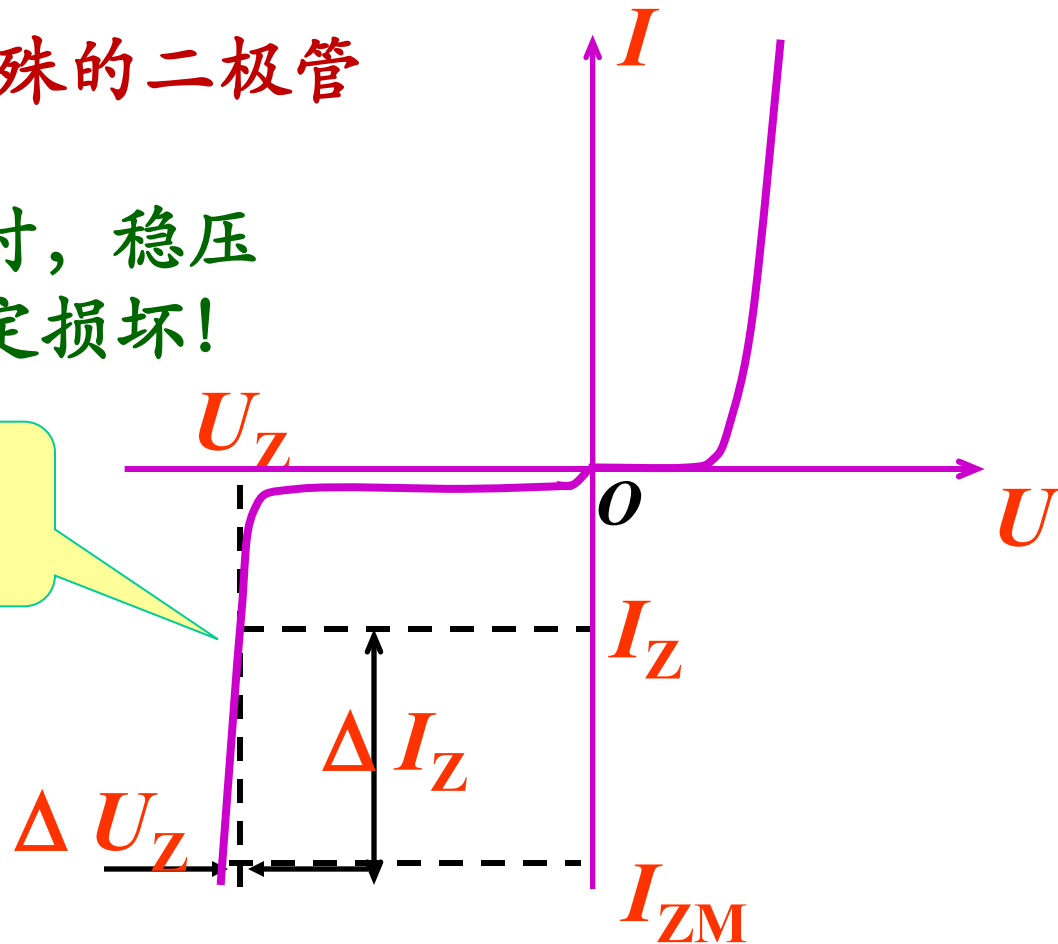
特殊的二极管

反向击穿时，稳压  
管并不一定损坏！

曲线越陡  
电压越稳

稳压原理：

反向击穿以后，电  
流变化很大，但其  
两端电压变化很小



使用时要加限流电阻

## 稳压二极管的主要参数：

### (1) 稳定电压 $U_Z$

稳压管起稳压作用时管子两端的电压

### (2) 稳定电流 $I_{Zmin}$ , $I_{Zmax}$

稳压管工作在稳压状态时的工作电流

### (3) 动态电阻 $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$

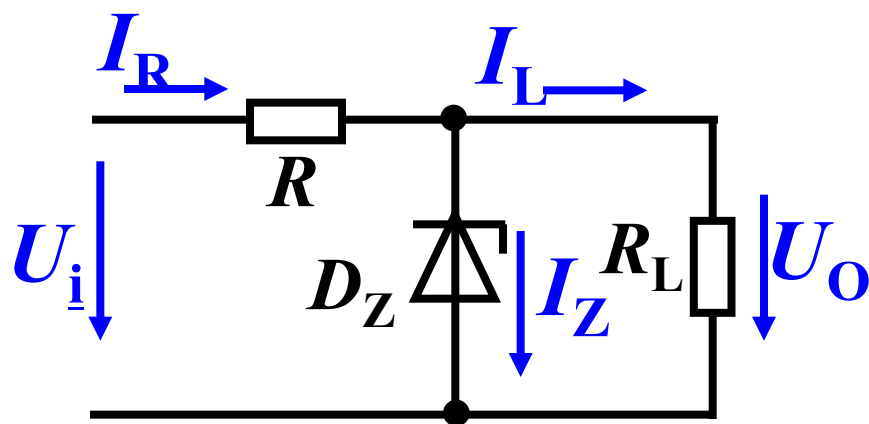
$r_Z$ 愈小，曲线愈陡，稳压性能愈好

### (4) 额定功耗

$$P_{ZMax} = U_Z I_{ZMax}$$

## 稳压二极管稳压电路

$U_i$  或  $R_L$  发生波动时，负载电压  $U_O$  基本不变

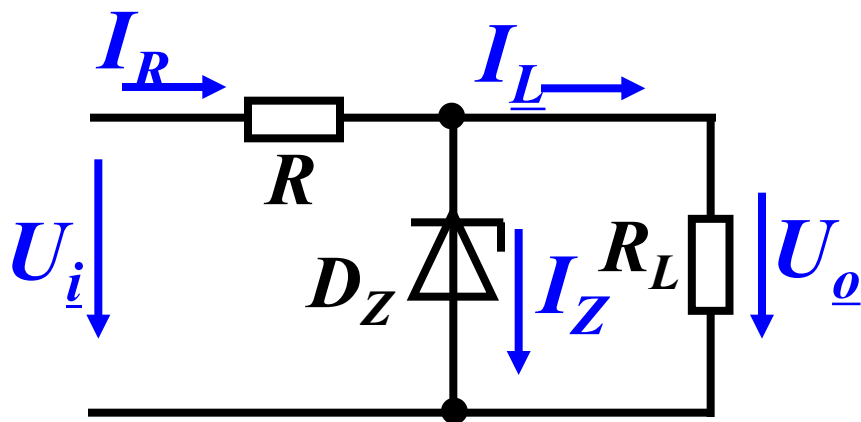


$U_i$  发生波动（增大）时-》负载电压  $U_O$  波动（增大）

$U_Z$  波动（增大）-》  $I_Z$  波动（增大很多）-》  $I_R$  波动（增大很多）-》  $U_O$  基本不变

## 稳压二极管稳压电路

$U_i$  或  $R_L$  发生波动时，负载电压  $U_o$  基本不变



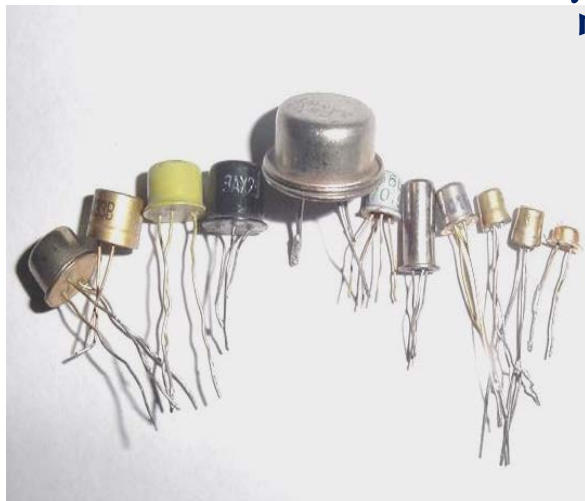
$R_L$  发生波动（增大）时-》负载电压  $U_o$  波动（增大）

$U_Z$  波动（增大）-》  $I_Z$  波动（增大很多）-》  $I_R$  波动（增大很多）-》  $U_R$ （增大）-》  $U_o$ （减小）维持基本不变



## § 1.3 晶体管（三极管）

常见晶体管外形图



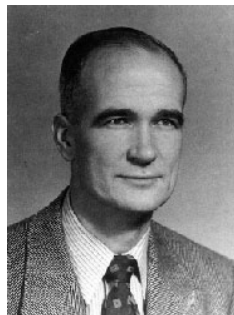
(a) 金属圆壳封装三极管



(b) 塑料封装三极管



(c) 大功率三极管



**威廉·肖克利, 美国科学家**  
**晶体管之父, 1956年诺贝尔物理学奖**

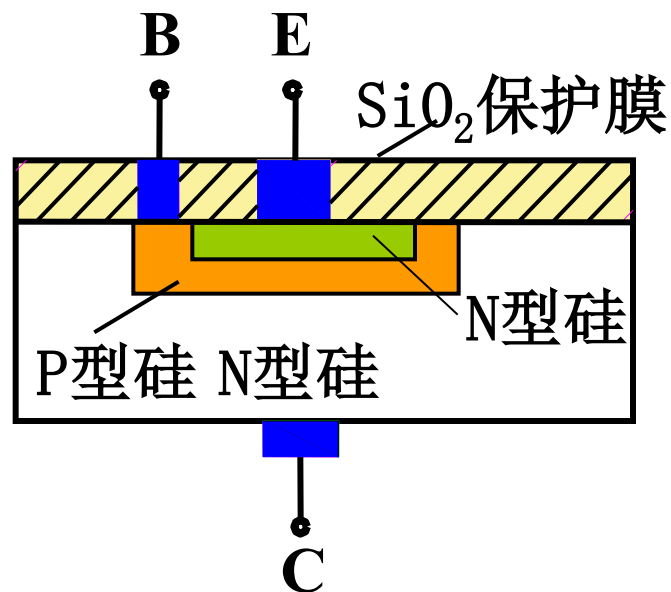
## 视频资料

- 晶体管制造工艺 0:30-2:20
- 晶体管放大条件和原理 2:20---4:50
- 电流分配关系 \* 4:50 ---8:50
- 温度对电流的影响 \* 8:50---

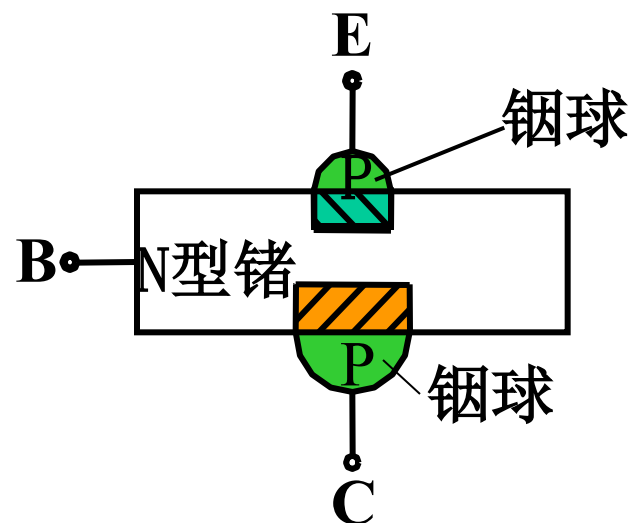


## § 1.3.1 结构和符号

结构图



(a) 平面型

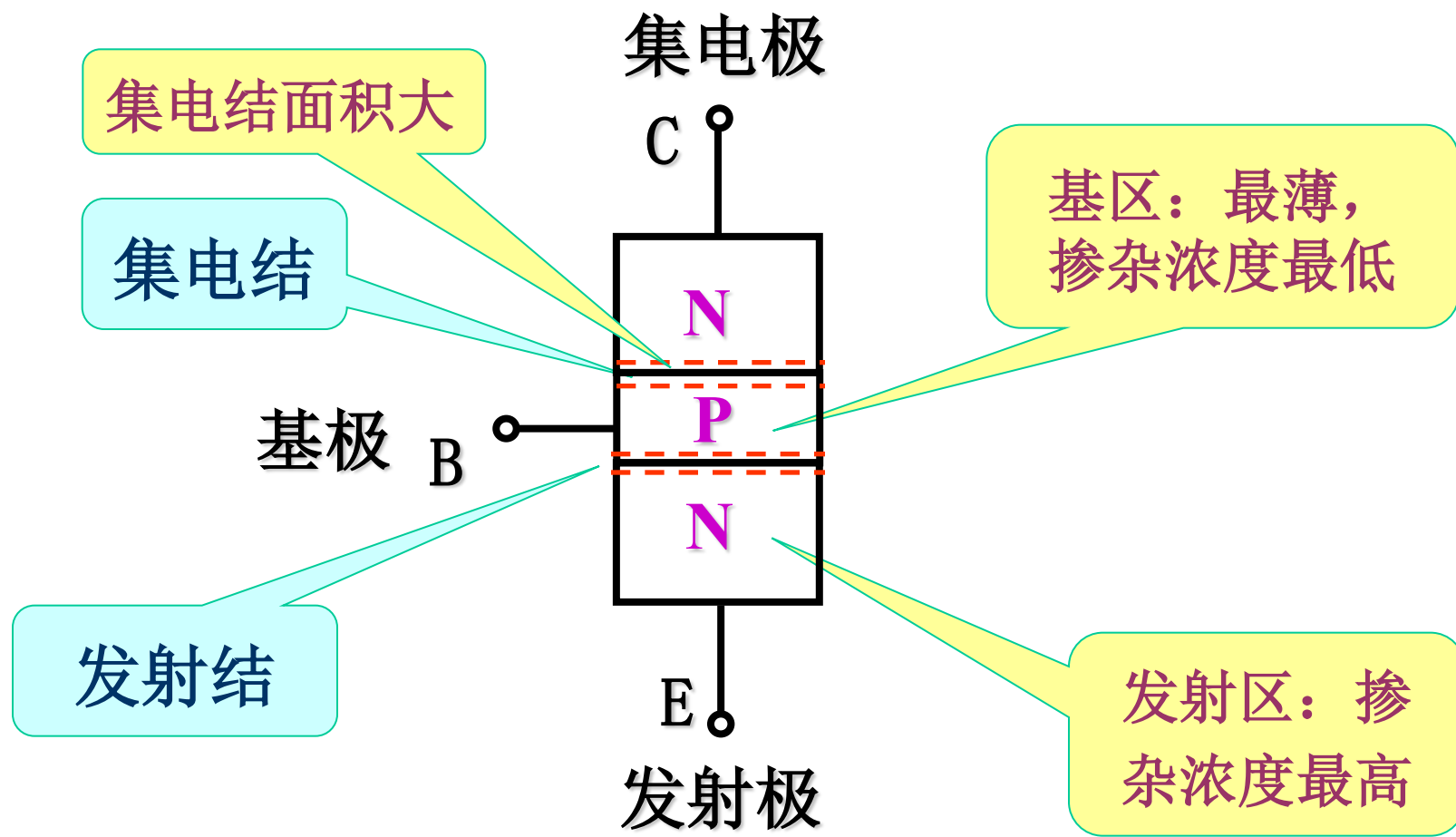


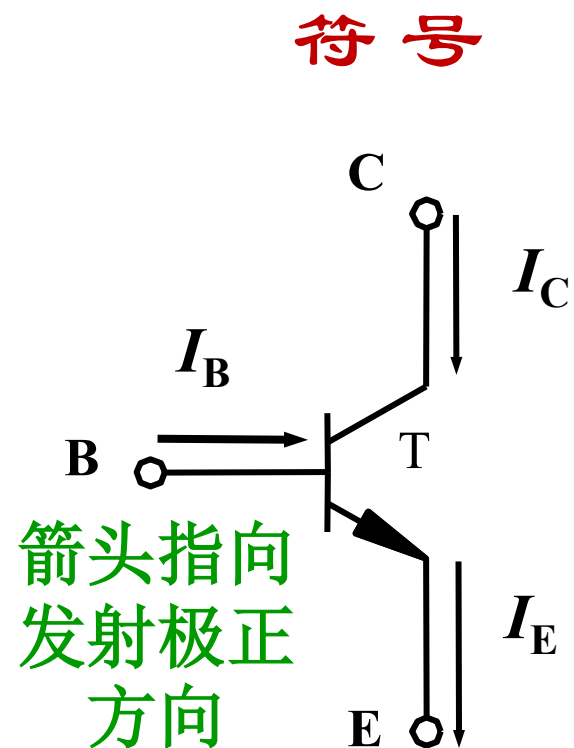
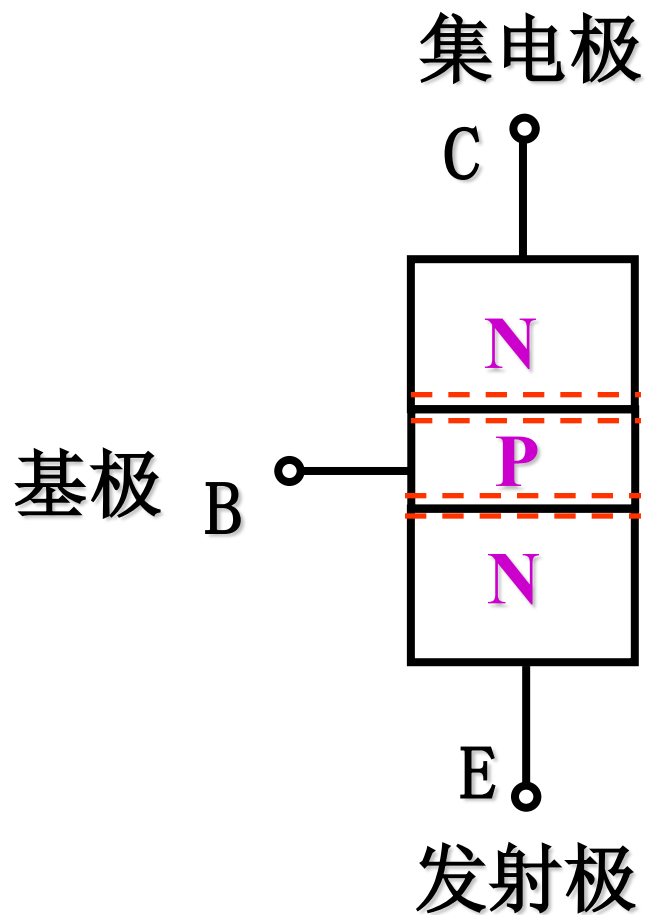
(b) 合金型

硅管主要是平面型，锗管都是合金型

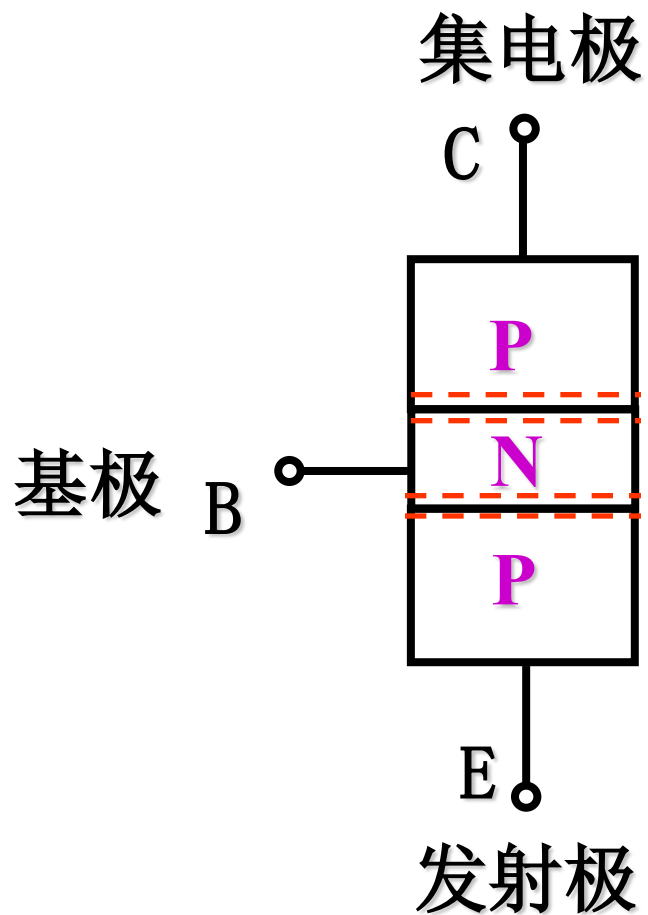


## 双极型晶体三极管结构特点

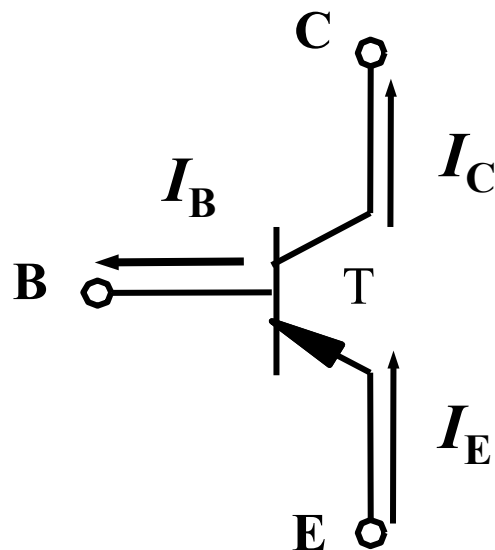




**NPN型晶体管**



符 号



箭头指向  
发射极正  
方向

PNP型晶体管

## § 1.3.2 特性曲线 (共射)

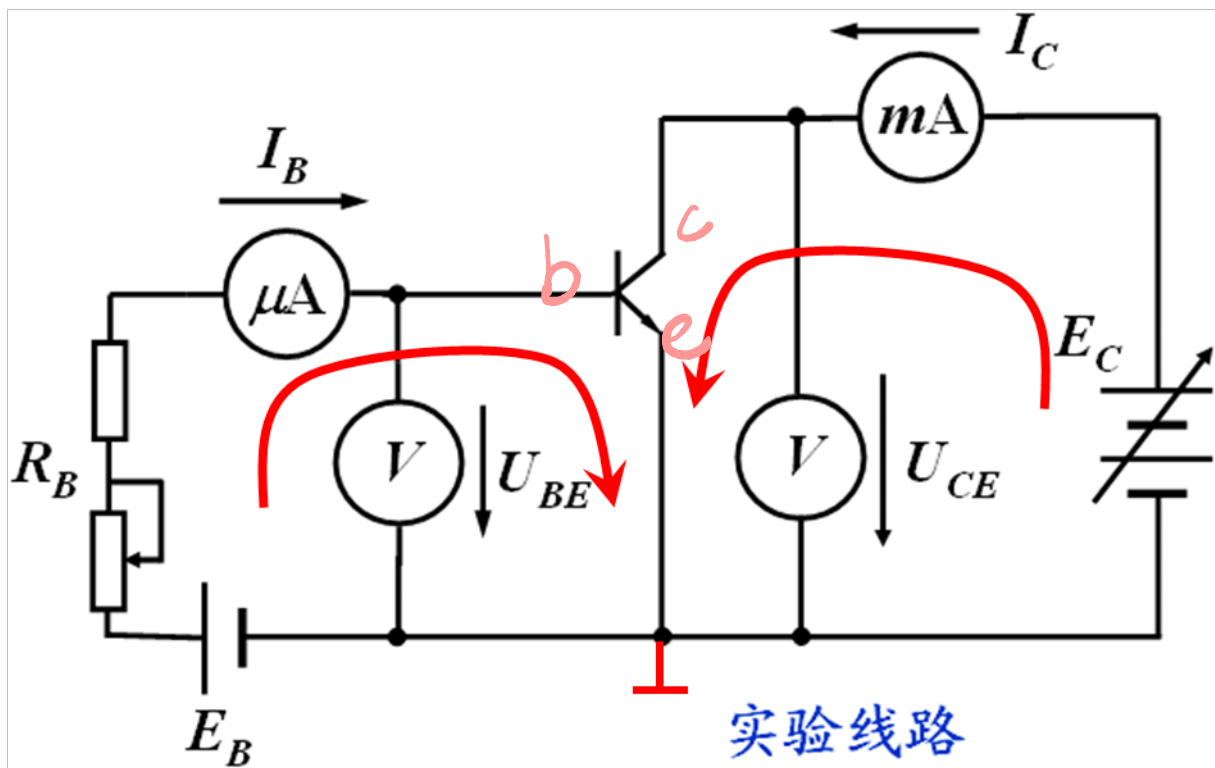
输入特性曲线

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

输出特性曲线

$$I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B=\text{常数}}$$

输入回路

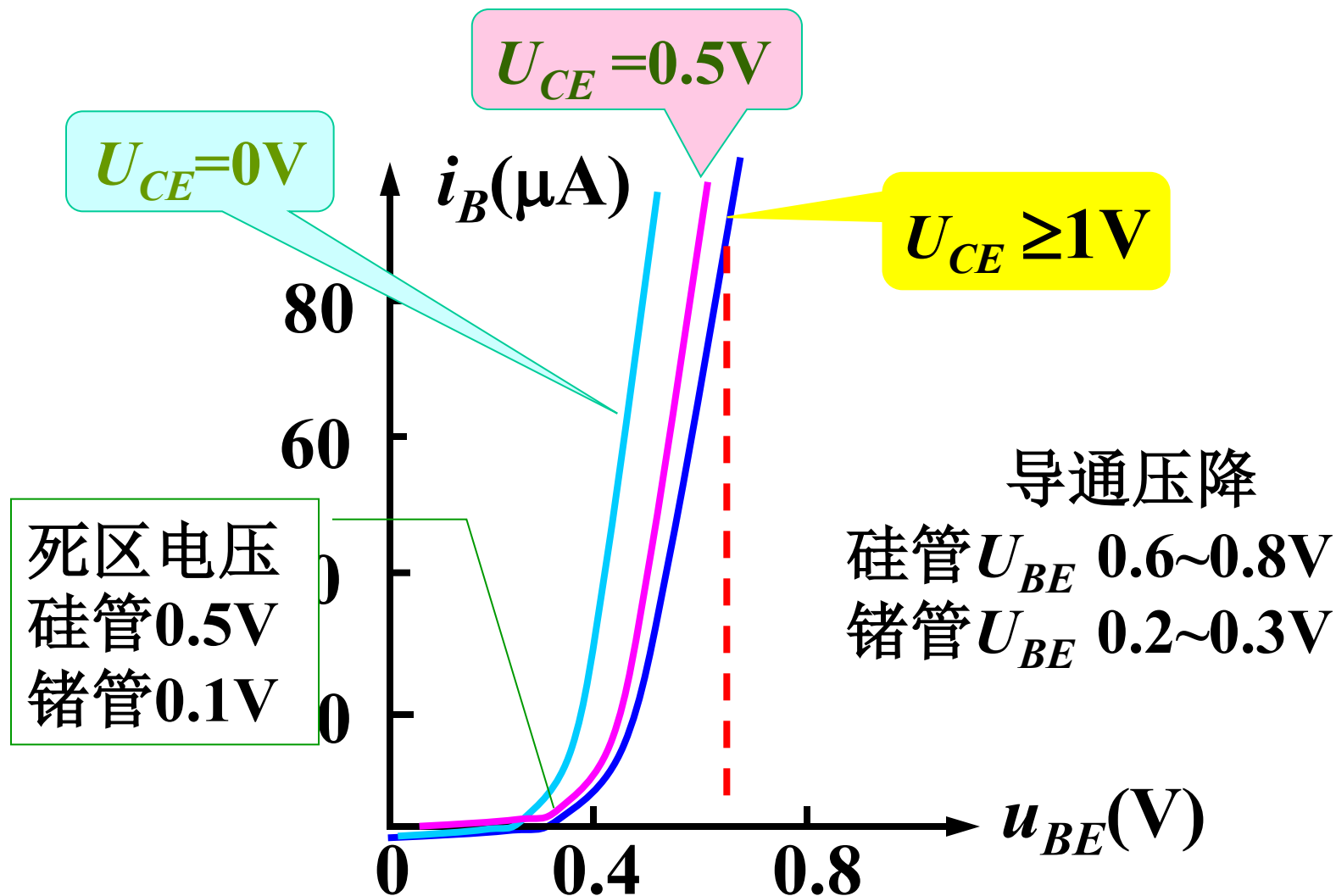


输出回路

共射接法

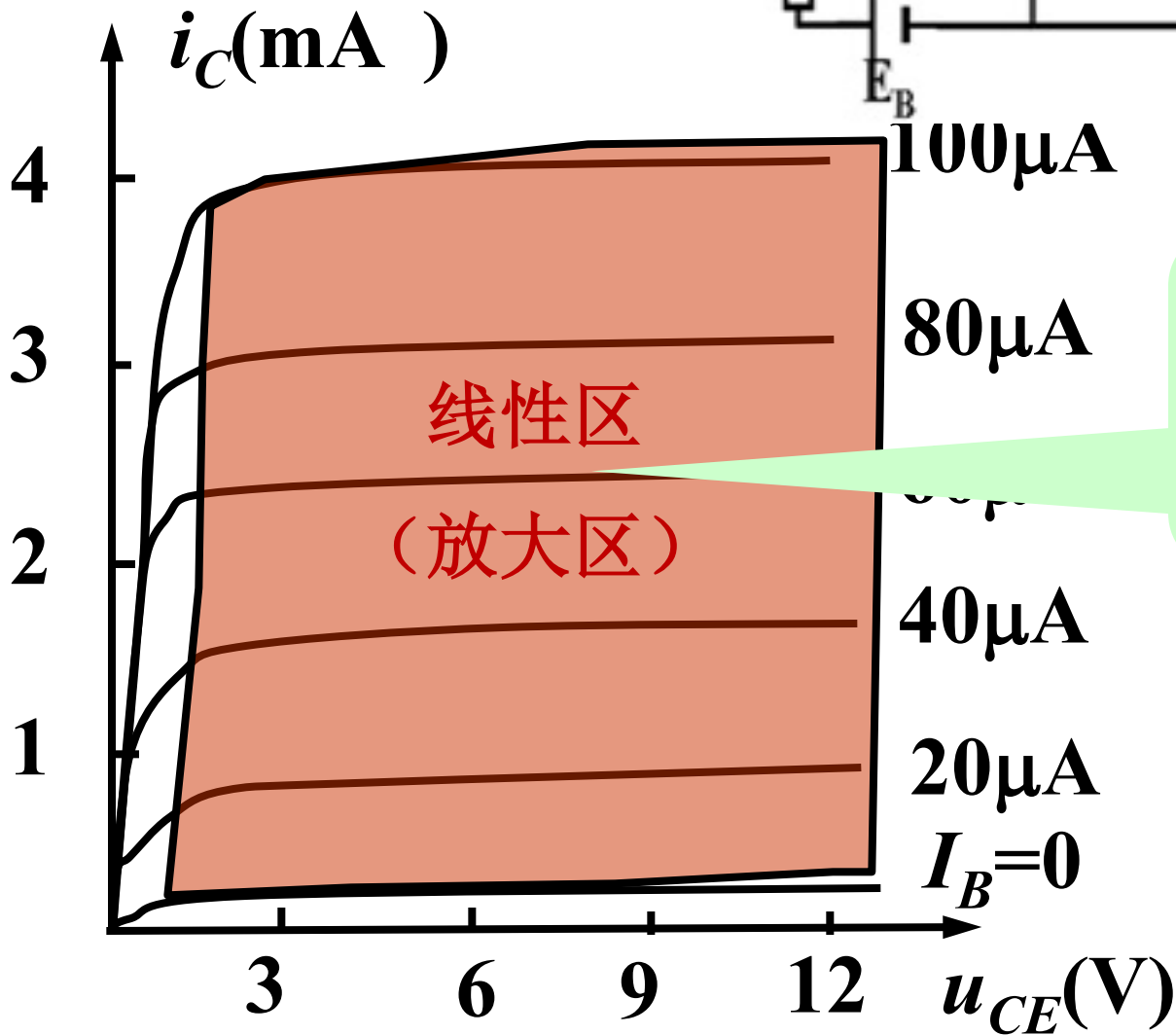
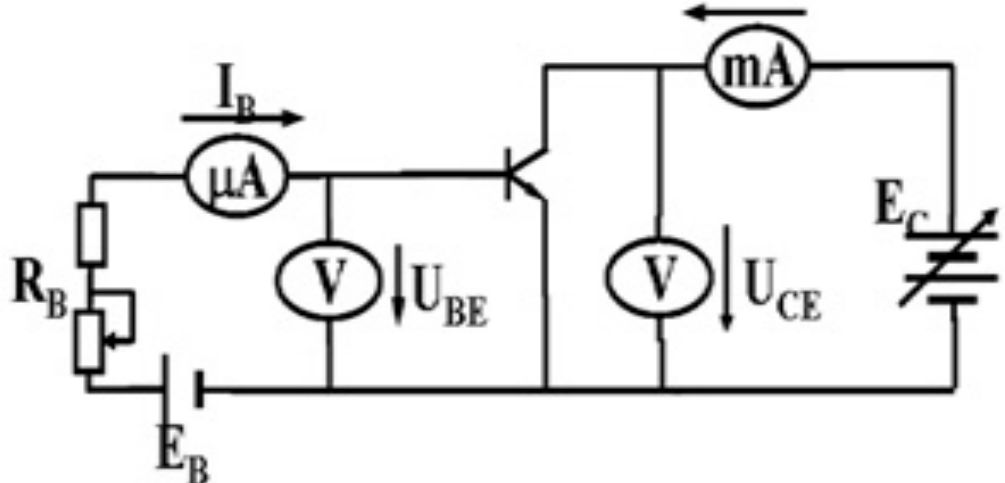
# 输入特性曲线

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常数}}$$



# 输出特性曲线

$$I_C = f(U_{CE})|_{I_B = \text{常数}}$$



$I_C$  只与  $I_B$  有关

$$I_C = \beta I_B$$

$$\Delta I_C = \beta \Delta I_B$$

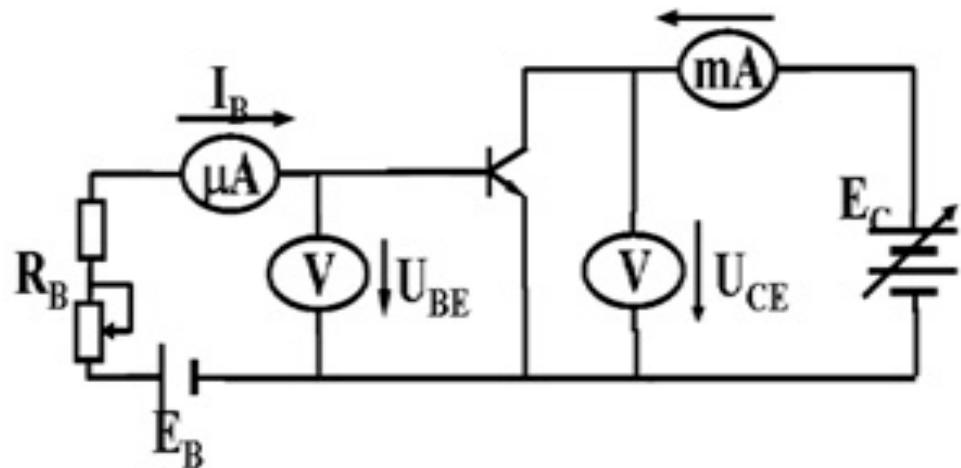
发射结正偏

集电结反偏

发射结正偏

集电结正偏

$$I_C < \beta I_B$$



$i_C(\text{mA})$

100 $\mu A$

80 $\mu A$

60 $\mu A$

40 $\mu A$

20 $\mu A$

$I_B=0$

饱和区

深度饱和时

$$U_{CE} \approx 0$$

4

3

2

1

3

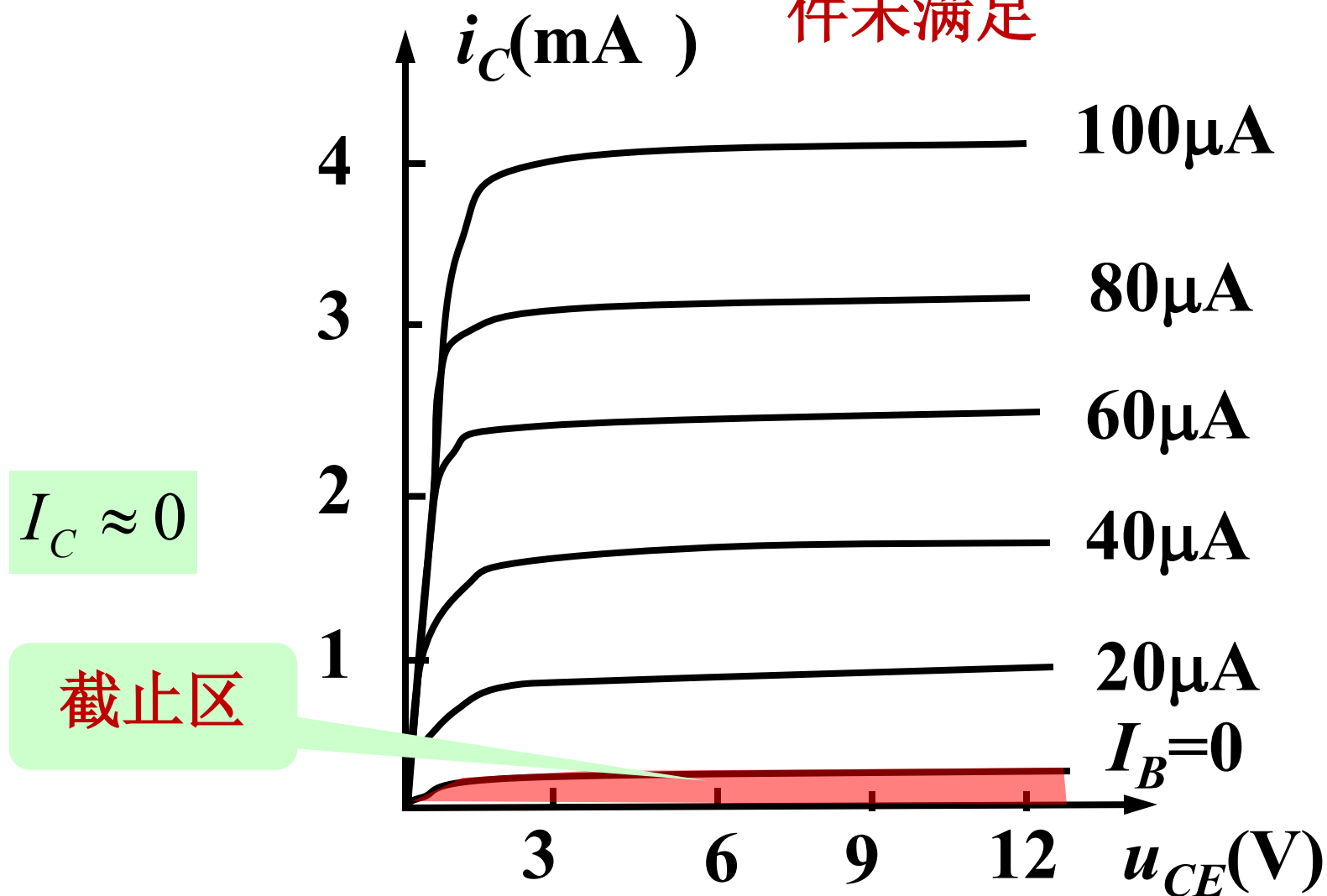
6

9

12

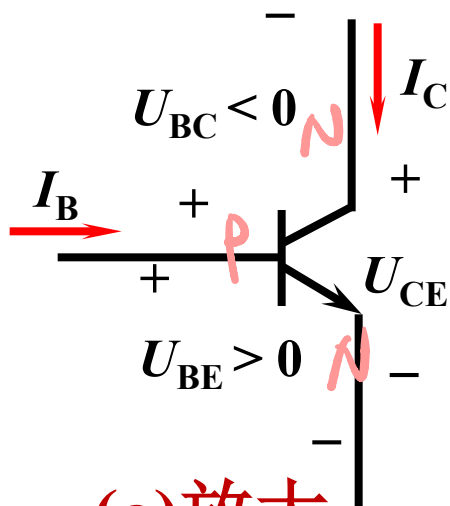
$u_{CE}(\text{V})$

发射结正偏条件未满足





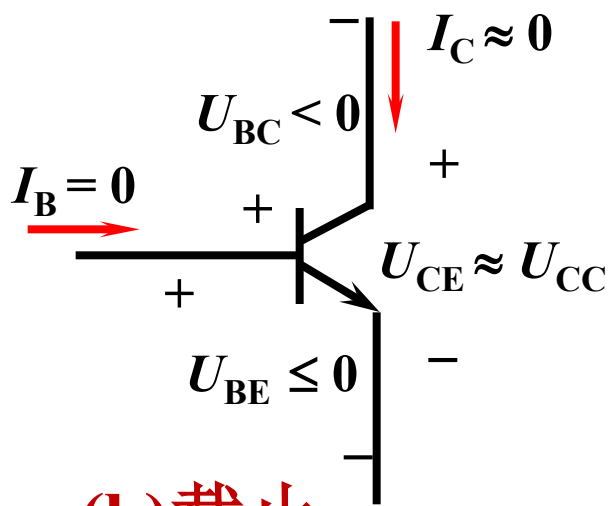
# 晶体管三种工作状态



(a)放大

$$I_C = \beta I_B$$

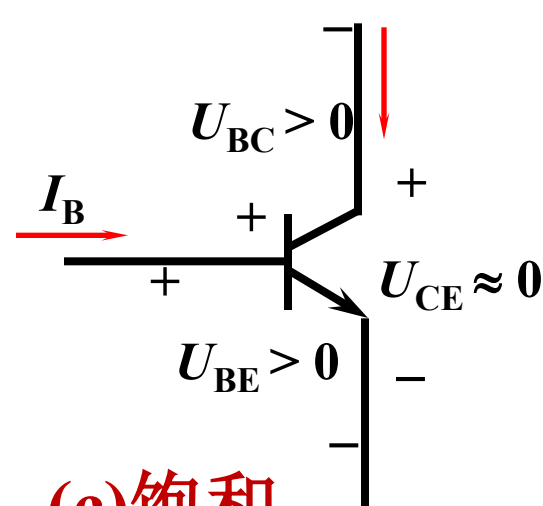
$$\text{且 } \Delta I_C = \beta \Delta I_B$$



(b)截止

$$I_C \approx 0$$

发射极和集电极之间如同开关断开，电阻很大。



(c)饱和

$$U_{CE} \approx 0$$

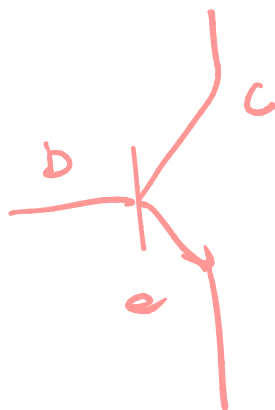
发射极和集电极之间如同开关接通，电阻很小

模拟电路工作q

数字电路

对某电路中一个NPN型硅管进行测试，测得  $U_{BE} > 0$ ,  $U_{BC} < 0$ ,  $U_{CE} > 0$ , 则此管工作在 ( )

- ☒ A 放大区
- ☐ B 饱和区
- ☐ C 截止区



提交

电路中工作在放大区的晶体三极管的集电极电流和基极电流具有什么关系？

☐ A  $I_C < \beta I_B$

☒ B  $I_C = \beta I_B$

☐ C  $I_C > \beta I_B$

☐ D  $I_C \approx 0$

提交

### § 1.3.3 主要参数

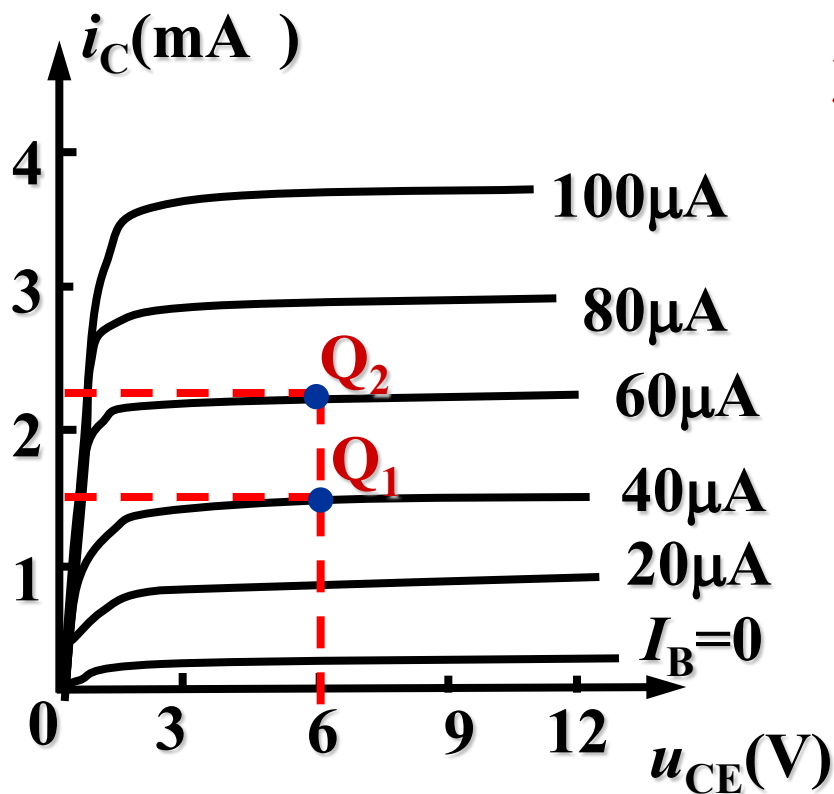
#### 1. 电流放大倍数 $\overline{\beta}$ 和 $\beta$

共射直流电流放大倍数:  $\overline{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$

共射交流电流放大倍数:  $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$

例：求 $\bar{\beta}$ 和 $\beta$  已知 $U_{CE}=6V$ 时：  $I_B=40\mu A$ ,  $I_C=1.5mA$

$I_B=60\mu A$ ,  $I_C=2.3mA$



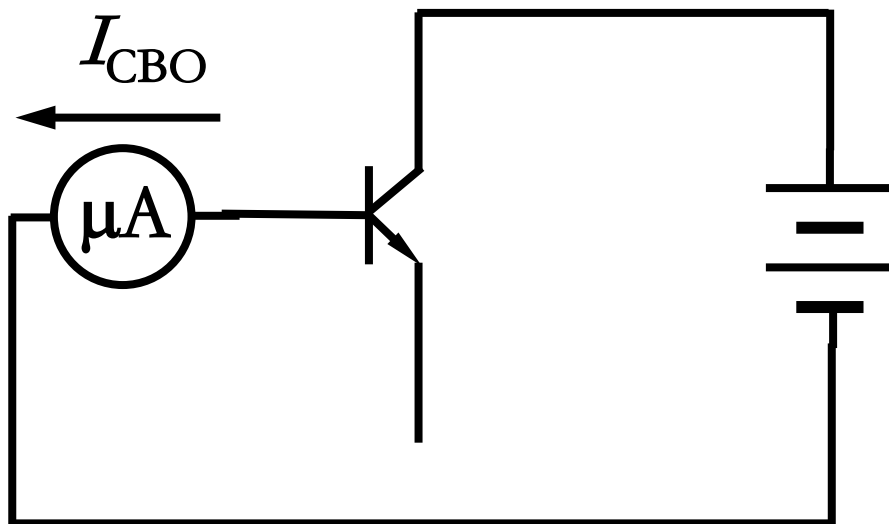
解：

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

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

在以后的计算中，一般作近似处理： $\beta = \bar{\beta}$

## 2. 集-基极反向截止电流 $I_{CBO}$



$I_{CBO}$  是集电结反偏由少子的漂移形成的反向电流，受温度的变化影响

## 3. 集-射极反向截止电流 $I_{CEO}$ (穿透电流)

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

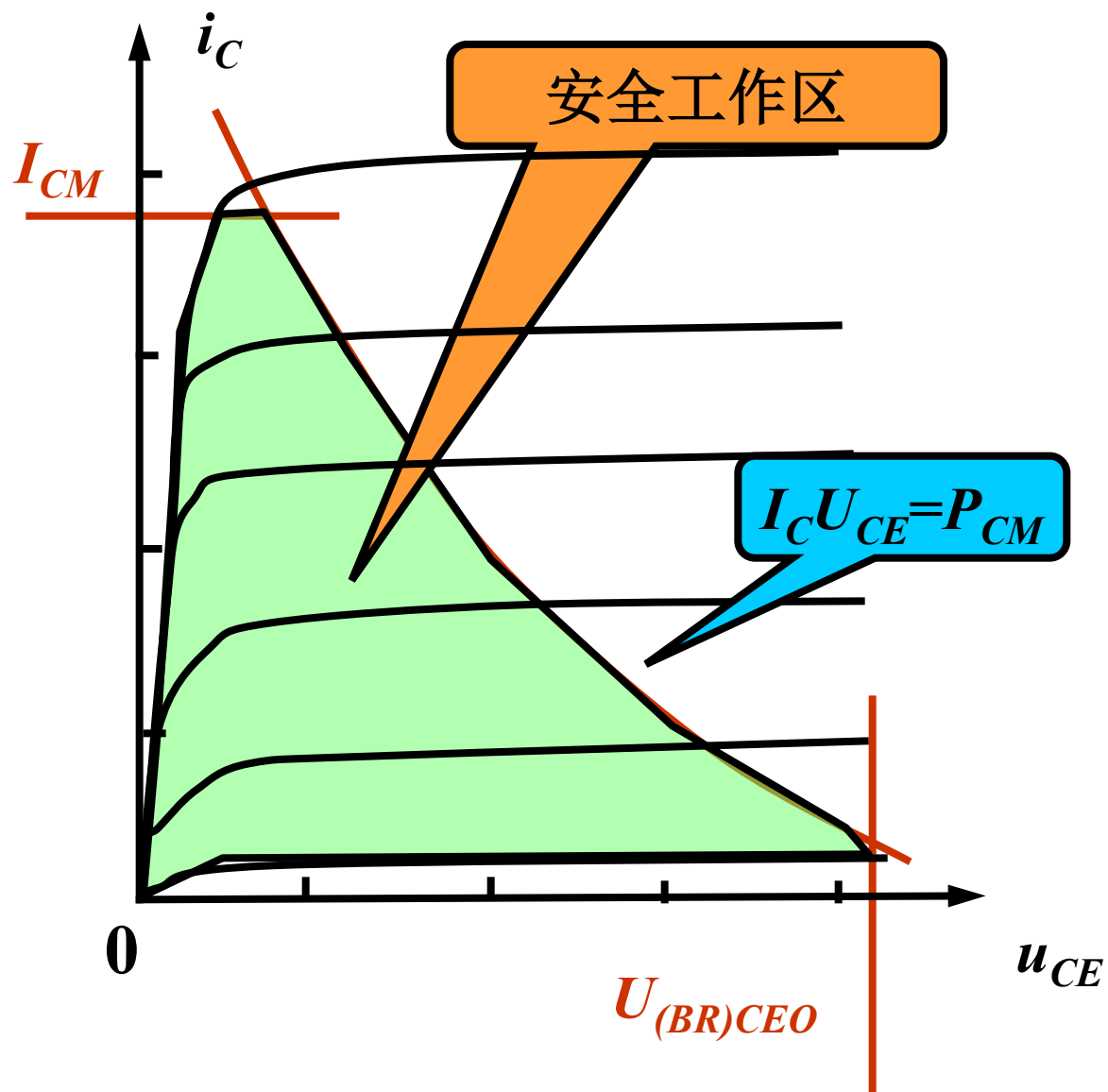
## 4. 极限参数

集电极最大允许电流  $I_{CM}$

集-射极反向击穿电压  $U_{(BR)CE0}$

集电极最大允许功耗  $P_{CM}$

$$P_C = I_C U_{CE}$$





例:  $\beta = 50$ ,  $U_{SC} = 12V$   $R_B = 70k\Omega$ ,  
 $R_C = 6k\Omega$  当  $U_{SB} = -2V$ ,  $2V$ ,  $5V$  时,  
 晶体管处于何种工作状态?

解: 当  $U_{SB} = -2V$  时:

$$I_B = 0, \quad I_C = 0$$

截止

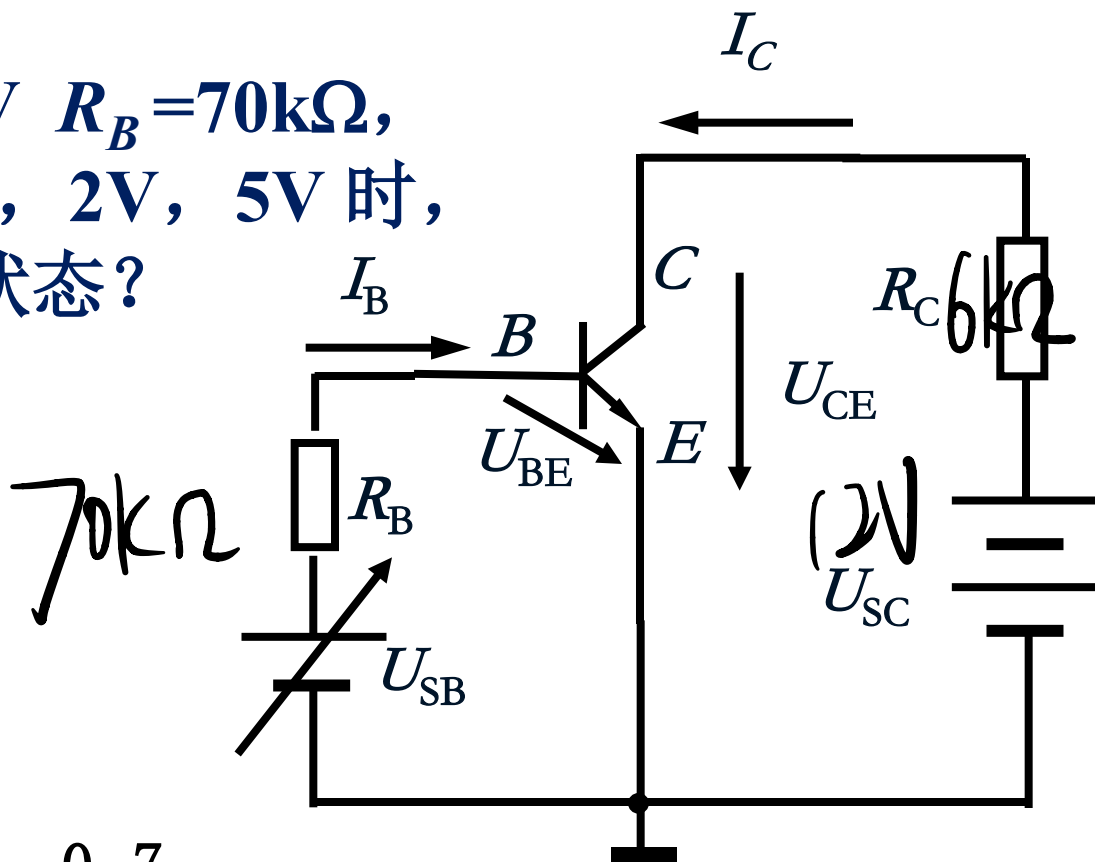
当  $U_{SB} = 2V$  时:

$$I_B = \frac{U_{SB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{2 - 0.7}{70} = 19\mu A$$

假定在放大区  $I_C = \beta I_B = 50 * 19 = 950\mu A = 0.95mA$

$$U_{CE} = U_{SC} - I_C R_C = 12 - 6 * 0.95 \approx 6V$$

$U_{CE} > U_{BE}$  假定成立 放大



当  $U_{SB}=5V$  时:

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{70} = 62 \mu A$$

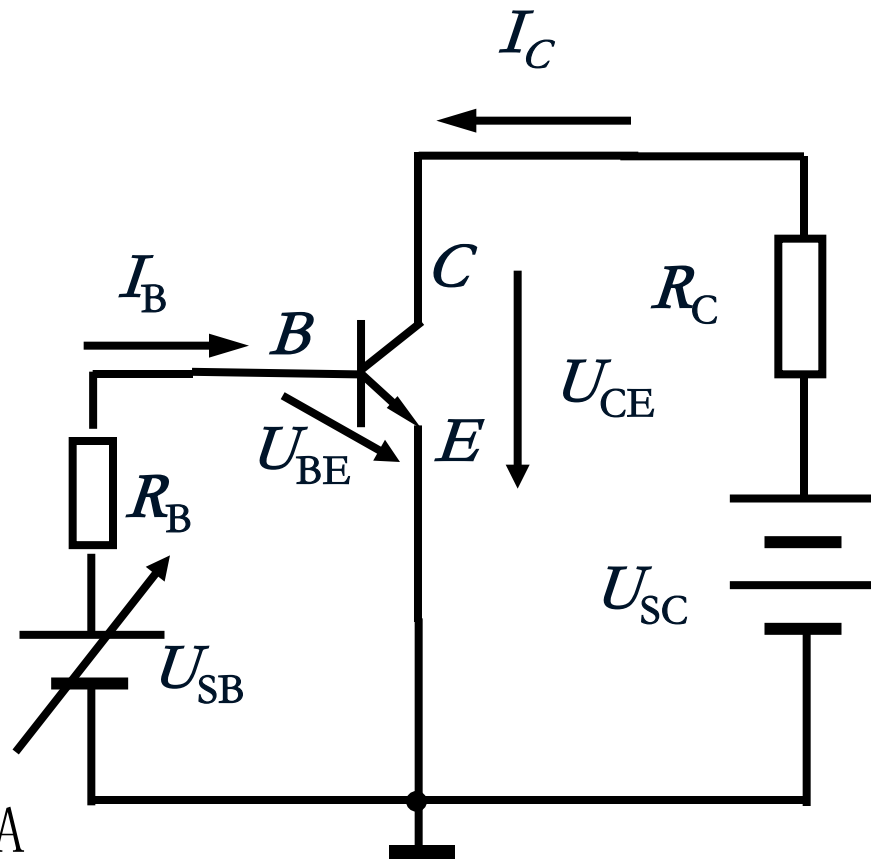
假定在放大区

$$I_C = \beta I_B = 50 * 62 = 3.1 mA$$

$$U_{CE} = U_{SC} - I_C R_C = 12 - 6 * 3.1 < 0V$$

$$U_{CE} < U_{BE}$$

假定不成立 饱和



解2: 先算 $I_C$  最大值

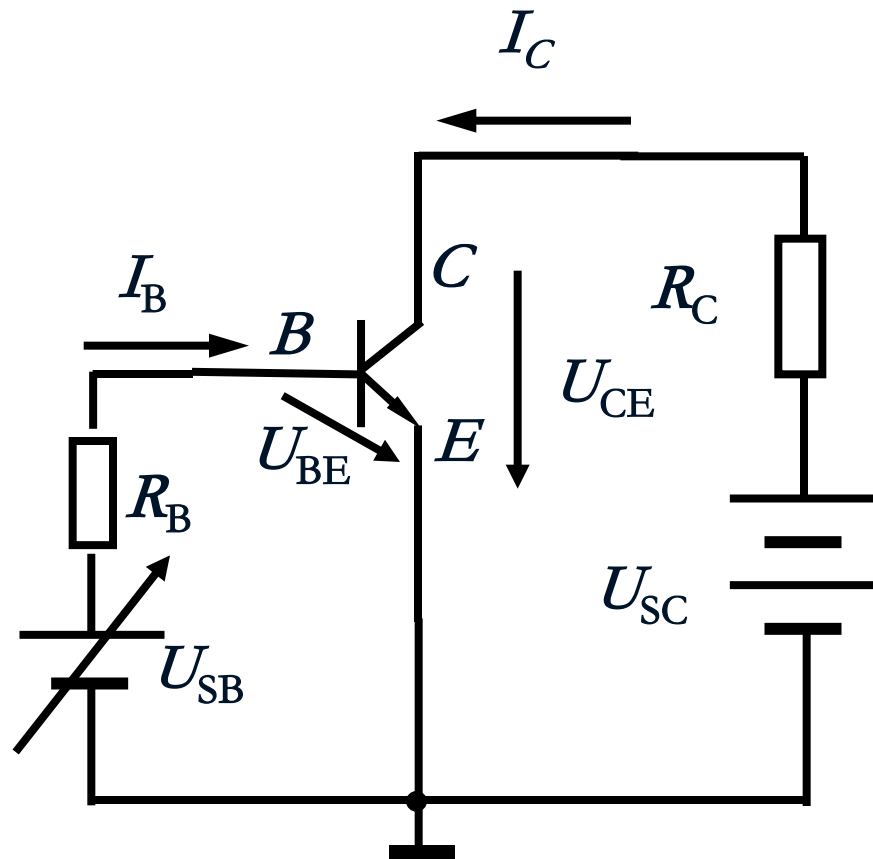
$$I_{C_{\max}} \approx \frac{U_{SC}}{R_C} = \frac{12}{6} = 2\text{mA}$$

算临界饱和时电流 $I_B$

$$I_B' \approx \frac{2\text{mA}}{50} = 40\mu\text{A}$$

当 $U_{SB}=2\text{V}$ 时  $I_B = 19\mu\text{A} < 40\mu\text{A}$  放大

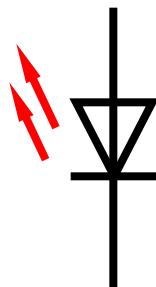
当 $U_{SB}=5\text{V}$ 时  $I_B = 62\mu\text{A} > 40\mu\text{A}$  饱和



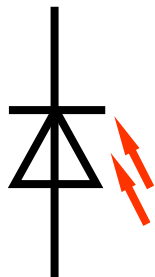
## 补充：光电器件

### 发光二极管(LED)

加上正向电压并有足够大的正向电流时，能发出一定波长范围的光。



### 光电二极管



工作在反向电压作用下

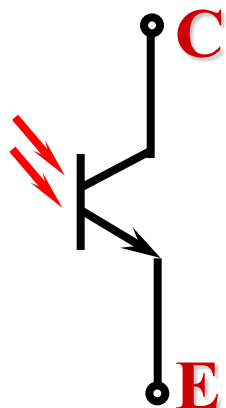
无光照时和普通二极管一样，反向电流很小，称为暗电流

有光照时，产生的反向电流称为光电流。

照度越强，光电流也越大。

光电流一般只有几十微安，应用时须放大

# 光电晶体管



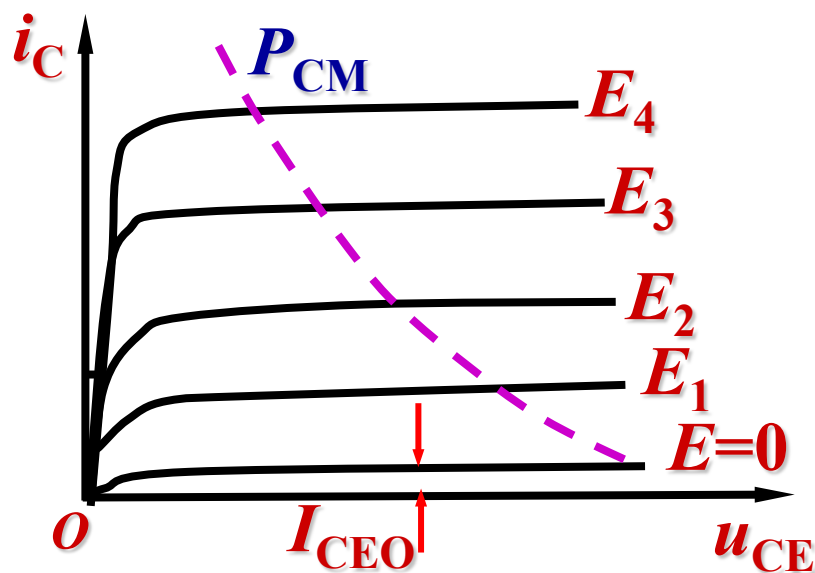
用入射光照度的强弱来控制集电极电流

无光照时，集电极电流很小，称为暗电流

有光照时，集电极电流称为光电流

电流大小和光照强度有关

零点几毫安到几毫安



输出特性曲线