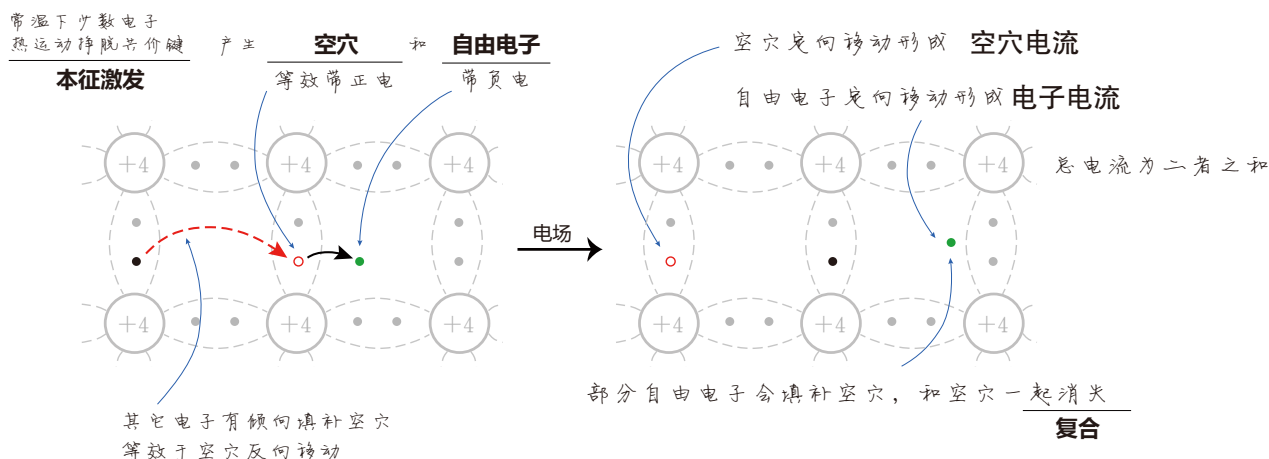


# 第一节 常用半导体器件

## 一 半导体基础知识

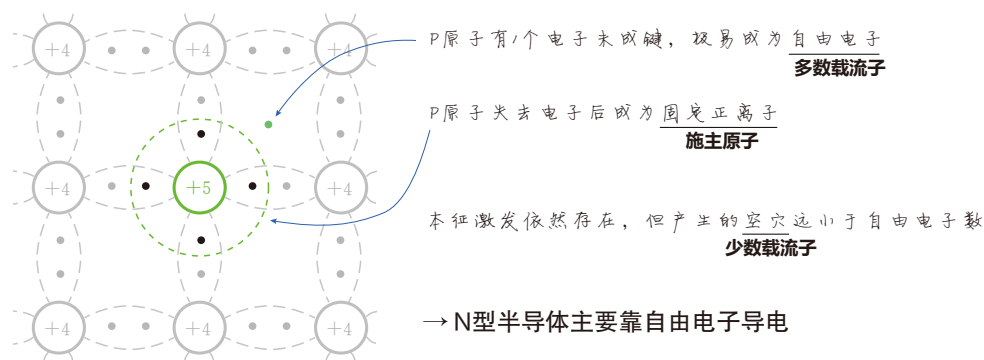
1. **本征半导体** 纯净的具有晶体结构的半导体，常用材料为四价元素 Si 或 Ge



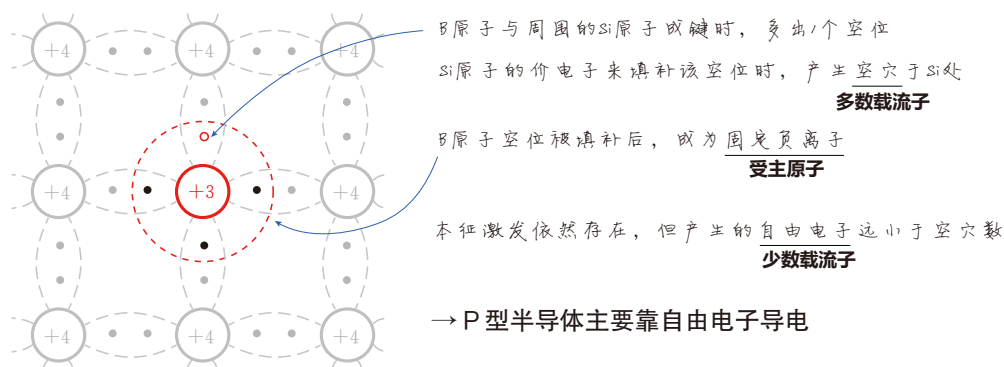
- 本征激发和复合最终存在**动态平衡** → 一定温度下，载流子的浓度一定，自由电子与空穴浓度相等
- 本征半导体的载流子浓度随温度升高而增加，但载流子浓度低，导电效果差，且受温度影响极大

2. **杂质半导体** 通过扩散工艺在本征半导体中掺入少量杂质元素

- ① **N 型半导体 (Negative)** 在四价晶体中掺入五价元素 P



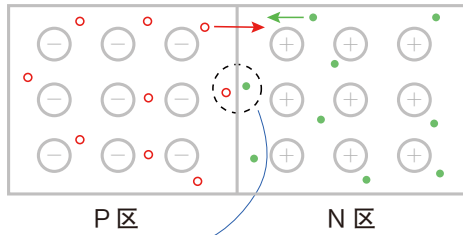
- ② **P 型半导体 (Positive)** 在四价晶体中掺入三价元素 B



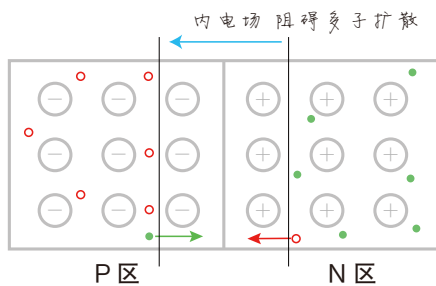
- 杂质半导体中多子浓度远高于少子，受温度影响不大，但少子浓度受温度影响极大

### 3. PN 结 将 P 型半导体和 N 型半导体制作在一起形成的结构

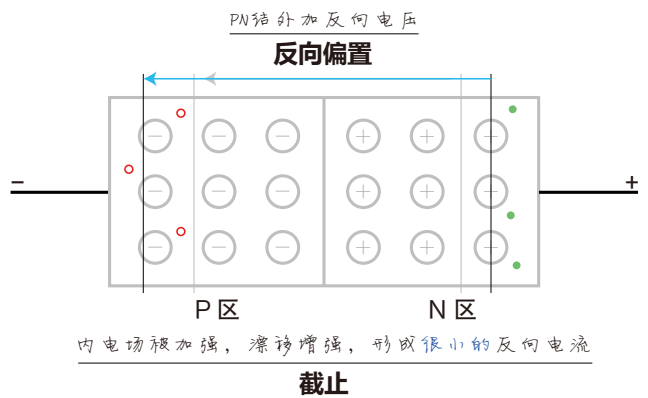
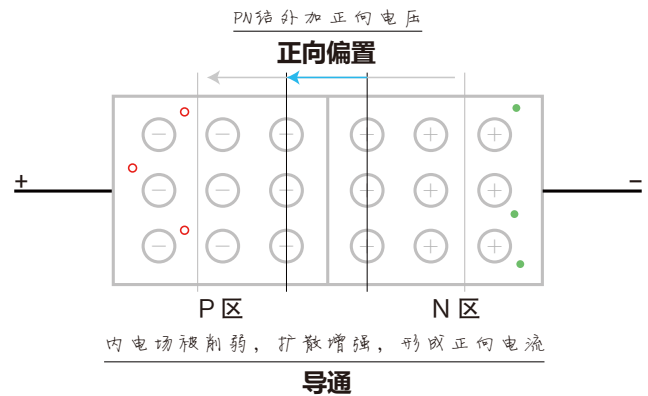
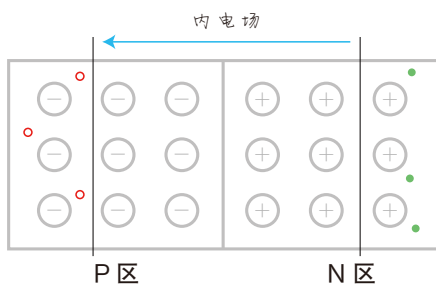
P 区中的空穴往 N 区中扩散 N 区中的自由电子往 P 区中扩散



扩散到对方区域的自由电子与空穴复合使固定离子电性不再被抵消，形成反向电场



两侧少子开始往对方区域移动  
漂移运动



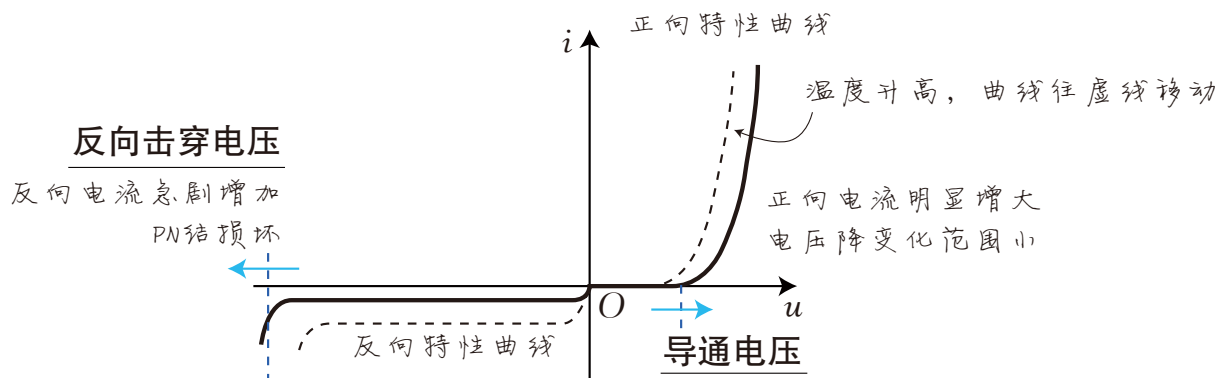
PN 结具有单向导电性：  
正向偏置时 PN 结导通，反向偏置时 PN 结截止

## 二 二极管

二极管 由 PN 结加电极引线与管壳构成



### 1. 二极管的特性曲线

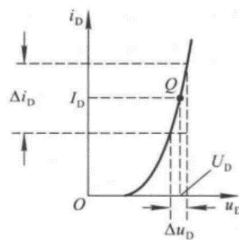


## 2. 二极管在电路中的参数

**工作点** 二极管工作时的电流与电压，需要同时满足自身特性曲线及外电路需求

- 在  $i-u$  图上作外电路曲线与自身特性曲线，交点  $Q(U_D, I_D)$  即为工作点

其中外电路方程  $U_D = U_S - RI_D$  在图上是一条直线



**静态电阻**

**动态电阻**

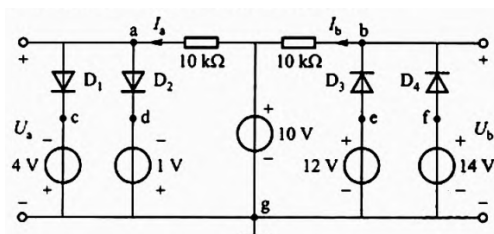
$$R_D = U_D / I_D \quad r_D = \lim_{\Delta i_D \rightarrow 0} \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$$

- 二极管电压发生微小变化  $\Delta u_D$  导致电流发生微小变化  $\Delta i_D$ ， $r_D$  为特性曲线斜率倒数

### 3. 理想二极管 导通时压降为恒定值 $U_{ON}$ ，截止时视为断路

- 通常硅管  $U_{ON} = 0.7V$ ，锗管  $U_{ON} = 0.3V$

**例 1** 设图中的二极管导通时的正向压降为  $0.7V$ 。求  $U_a$ 、 $U_b$  和  $I_a$ 、 $I_b$ ，并说明各个二极管的导通状况。



**解** 由图中电路可以直接得到各点电位：c 点  $-4V$ ，d 点  $-1V$ ，e 点  $12V$ ，f 点  $14V$

假设二极管  $D_1$  导通，则 a 点电位为  $-4V + 0.7V = -3.3V$ ，此时 ad 间电压为  $-2.3V$ ， $D_2$  截止

假设二极管  $D_2$  导通，则 a 点电位为  $-1V + 0.7V = -0.3V$ ，此时 ac 间电压为  $3.7V$ ， $D_1$  导通

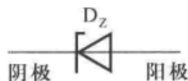
若根据  $D_1$  导通，则 a 点电位  $-3.3V$ ，与前述的  $-0.3V$  矛盾，因此这个假设不成立

同理，可得到  $D_3$  截止， $D_4$  导通

#### 总结 理想二极管导通状态的判断与电路分析

- ① 只有 1 个二极管时，将其断路，求出两侧电位差，若大于导通电压，则该二极管导通
- ② 当有多个二极管，且它们某一侧的电位相同，另一侧电位不同时，断路后两侧电位差最大的二极管导通，其余的都截止
- ③ 二极管导通后电压值等于导通电压，与二极管串联的电阻承担剩余电压

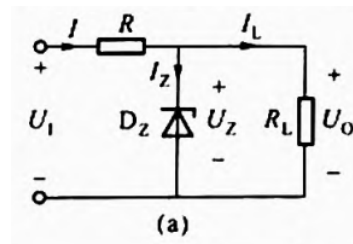
### 4. 稳压二极管 用于稳定电压的特殊二极管，工作在反向击穿状态



**稳定电压  $U_z$**  规定电流下稳压管的反向击穿电压，在电路中体现为二极管两端的电压恒为  $U_z$

**动态电阻  $r_z$**  稳压管工作在稳压区时，端电压变化量与电流变化量之比，**越小稳压特性越好**

- 例 2** 如图所示的稳压电路中, 已知稳压二极管的  $U_Z = 6V$ ,  $I_Z = 10mA$ , 动态电阻  $r_z = 10\Omega$ , 负载电阻  $R_L = 300\Omega$ , 输入电压  $U_1 = 12V$ 。求:
- (1) 限流电阻  $R$  的电阻值及所消耗的功率;
  - (2) 当输入电压  $U_1$  增加 5% 时, 负载两端电压  $U_O$  增加的百分数



**解** (1) 由稳压二极管的特性,  $U_Z = U_O = 6V$

$$\therefore I_L = \frac{U_O}{R_L} = \frac{6V}{300\Omega} = 20mA \quad I = I_Z + I_L = 30mA \quad R = \frac{U_1 - U_Z}{I} = \frac{12V - 6V}{30mA} = 200\Omega$$

$$P = U_R I = 6V \times 30mA = 0.18W$$

(2) 由稳压二极管的动态特性, 等效后的电路为线性电路, 由叠加定理,  $\Delta U_1$  引起  $\Delta U_O$

$$\text{由串并联, } \Delta I = \frac{U_1}{r_z // R_L + R}, \quad \Delta U_O = \frac{r_z // R_L}{r_z // R_L + R} \Delta U_1$$

$$\text{代入 } \Delta U_1 = 12 \times 5\% = 0.6V, \text{ 得 } \Delta U_O = 27.7mV, \text{ 变化百分比 } \frac{\Delta U_O}{U_O} \times 100\% = 0.46\%$$

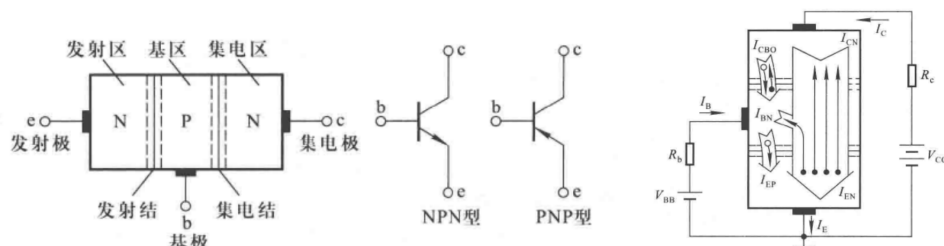
**总结** 稳压二极管的静态分析中, 要从稳压二极管两端电压为  $U_Z$  这个已知条件入手, 通过直流电路分析得到其它物理量。动态分析中则要将变化量作为电路的物理量, 然后稳压二极管替换为电阻  $r_z$ , 进行分析计算

### 三 双极晶体管

#### 1. 双极晶体管的结构与工作原理

晶体管含有 3 个依次连接的掺杂区, 形成 2 个 PN 结, 根据掺杂类型分为 NPN 和 PNP 型

- 基区很薄且杂质浓度很低
- 发射区掺杂浓度很高
- 集电区面积很大



- ①  $U_{BB}$  使发射结加正向电压, 扩散运动形成发射极电流  $I_E$ 
  - 发射区杂质浓度高  $\rightarrow$  发射区大量自由电子扩散进入基区, 基区极少量空穴进入发射区
- ② 扩散到基区的自由电子与空穴复合, 形成基极电流  $I_B$ 
  - 因为基区空穴极少, 所以只有少部分自由电子与空穴复合, 基极电源补充复合掉的空穴, 从而形成基极电流
- ③ 集电结加反向电压, 漂移运动形成集电极电流  $I_C$ 
  - ②中没有和空穴复合的自由电子在反向电压作用下进入集电区, 形成集电极电流
- ④ 三个电流的关系为  $I_B + I_C = I_E$ 
  - 晶体管的参数确定, 因此到达基区的自由电子的去向 (复合 or 漂移至集电极) 比例基本恒定
  - 因此  $I_B$  和  $I_C$  存在比例关系, 且  $I_C$  远大于  $I_B \rightarrow$  小电流  $I_B$  可以控制大电流  $I_C \rightarrow$  放大作用

## 2. 双极晶体管的基本特性 ※

- ① **输入特性** C、E 极间电压  $u_{CE}$  一定时, B 极电流  $i_B$  与 B、E 极间电压  $u_{BE}$  的关系

$$i_B = f_{in}(u_{BE})|_{u_{CE}=\text{常数}}$$

认为  $U_{CE} \geq 1V$  时输入特性曲线基本重合, 此时  $u_{CE}$  不再影响特性曲线

- ② **输出特性**  $I_B$  一定时, 集电极电流  $i_C$  与  $u_{CE}$  的关系

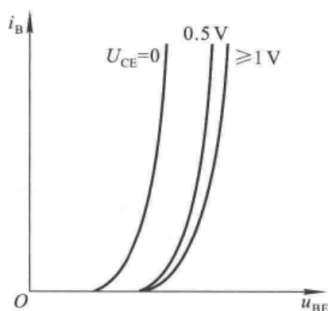
$$i_C = f_{out}(u_{CE})|_{i_B=\text{常数}}$$

- $u_{CE}$  从零逐渐增大时,  $i_C$  逐渐增大;  $u_{CE}$  增大到一定数值后, 曲线几乎平行于横轴
- 根据输出曲线, 图上不同的位置晶体管有不同的工作状态

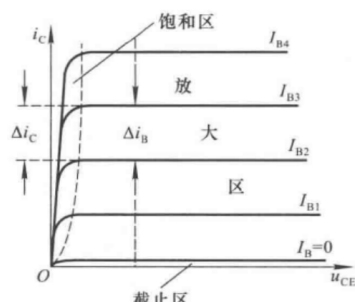
**截止区** 发射结电压小于导通电压, 集电结反向偏置, 此时 CE 间相当于开路

**饱和区** 发射结与集电结均处于正向偏置, 此时  $I_C$  不受  $I_B$  控制, 只随  $U_{CE}$  变化

**放大区** 发射结正向偏置, 集电结反向偏置, 此时  $I_C$  主要受  $I_B$  控制,  $U_{CE}$  的影响极小



输入特性曲线



输出特性曲线

- ③ **主要参数** (实际上不严格区分这两个参数)

**直流电流放大系数**

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

**交流电流放大系数**

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

**例 3** 今测得电路中处于放大状态的晶体管  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  各个电极对地电位如下表所示。判断各晶体管的 E、B、C 极及管型 (硅管或锗管, NPN 型或 PNP 型)

| 晶体管    | $T_1$ |    |      | $T_2$ |   |    | $T_3$ |      |    |
|--------|-------|----|------|-------|---|----|-------|------|----|
| 电极编号   | 1     | 2  | 3    | 1     | 2 | 3  | 1     | 2    | 3  |
| 电极电位/V | +6    | +3 | +2.3 | -0.7  | 0 | -6 | -1    | -1.3 | -6 |

**解** 不管是哪种类型的管子, 工作在放大状态时, 基极的电位一定是居中的

以  $T_1$  管为例, 居中的电位为 +3V, 因此电极 2 为基极 B

另外两个电极中, 电极 3 电位比电极 2 低 0.7V, 电极 1 则比电极 2 高 3V

因为 BE 间的导通电压不是 0.7V 就是 0.3V, 因此电极 3 为发射极 E, 电极 1 为集电极 C

由此可得到该管为硅管, C 电极电位最高, 因此为 NPN 型

其余 2 个晶体管同理, 结果见下表

| 晶体管    | T <sub>1</sub> |    |      | T <sub>2</sub> |   |    | T <sub>3</sub> |      |    |
|--------|----------------|----|------|----------------|---|----|----------------|------|----|
| 电极编号   | 1              | 2  | 3    | 1              | 2 | 3  | 1              | 2    | 3  |
| 电极电位/V | +6             | +3 | +2.3 | -0.7           | 0 | -6 | -1             | -1.3 | -6 |
| 电极名称   | C              | B  | E    | B              | E | C  | E              | B    | C  |
| 管型     | NPN 型 硅管       |    |      | PNP 型 硅管       |   |    | PNP 型 锗管       |      |    |

### 总结 工作在放大状态下的晶体管

- ① 电位居中的电极为基极 B
- ② 与基极电位相差 0.7V 或 0.3V 的为发射极 E，剩余的电极是集电极 C
- ③ 相差 0.7V 为硅管，相差 0.3V 为锗管
- ④ 集电极电位最高的为 NPN 型，最低的为 PNP 型

### 2. 已知各电极电位，判断工作状态

**例 4** 今测得电路中处于某电路中 PNP 型硅晶体管 T<sub>1</sub> ~ T<sub>4</sub> 各个电极和公共端之间的电压 U<sub>E</sub>、U<sub>B</sub> 和 U<sub>C</sub> 如表所示，判断各晶体管的工作状态

| 晶体管            | E 极电位/V | B 极电位/V | C 极电位/V |
|----------------|---------|---------|---------|
| T <sub>1</sub> | 0       | 0.7     | 10      |
| T <sub>2</sub> | 2       | 2.7     | 2.3     |
| T <sub>3</sub> | 0       | -3      | 6       |
| T <sub>4</sub> | 2       | 2.7     | 3.2     |

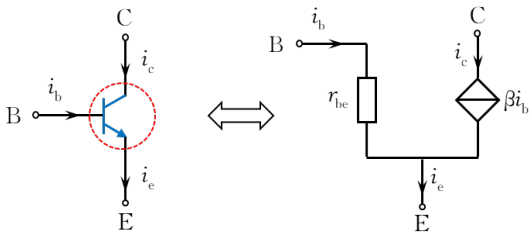
**解** T<sub>1</sub>:  $\varphi_B > \varphi_E$  (发射结正偏)  $\varphi_B < \varphi_C$  (集电结反偏)，为放大状态  
T<sub>2</sub>:  $\varphi_B > \varphi_E$  (发射结正偏)  $\varphi_B > \varphi_C$  (集电结正偏)，为饱和状态  
T<sub>3</sub>:  $\varphi_B < \varphi_E$  (发射结反偏)  $\varphi_B < \varphi_C$  (集电结反偏)，为截止状态  
T<sub>4</sub>:  $\varphi_B > \varphi_E$  (发射结正偏)  $\varphi_B < \varphi_C$  (集电结反偏)，为放大状态

### 总结 对于已知管型和各引脚电位的晶体管，判断工作状态：

- ① B 电位居中时，发射结正偏，集电结反偏，为放大状态
- ② NPN 型 B 电位最小 或 PNP 型 B 电位最大时，发射结和集电结均反偏，为截止状态
- ③ NPN 型 B 电位最大 或 PNP 型 B 电位最小时，发射结和集电结均正偏，为饱和状态

### 3. 双极晶体管的微变等效模型

· 晶体管的电流电压只在某工作点 Q 附近微小变化时，才可以用线性电路等效



输入电阻 定义式

输入电阻 计算式

$$r_{be} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}$$

$$r_{be} = r_b + (\beta + 1) \frac{26}{I_E}$$

·  $I_E$ : 工作点 Q 的发射极电流，单位为 mA

注：① 同一晶体管的不同静态工作点 Q 对应不同的微变等效模型参数

模型体现的是输入电压和输入电流微小变化量间的关系

② 该模型实际上忽略了  $U_{CE}$  对  $I_B$  和  $I_C$  的影响