



模拟电子技术基础

# 半导体二极管与三极管

雷 飞

010-67392914

leifei@bjut.edu.cn

## ➤ 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

- **导体**：自然界中很容易导电的物质称为导体，金属一般都是导体
- **绝缘体**：有的物质几乎不导电，称为绝缘体，如橡皮、陶瓷、塑料和石英
- **半导体**：另有一类物质的导电特性处于导体和绝缘体之间，称为半导体，如锗、硅、砷化镓和一些硫化物、氧化物等

**本征半导体**：纯净的具有晶体结构的半导体

## ➤ 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### 半导体的导电特性

□ 当受外界热和光的作用时，它的导电能力明显变化

-----光敏器件



□ 往纯净的半导体中掺入某些杂质，其导电能力明显改变

-----二极管



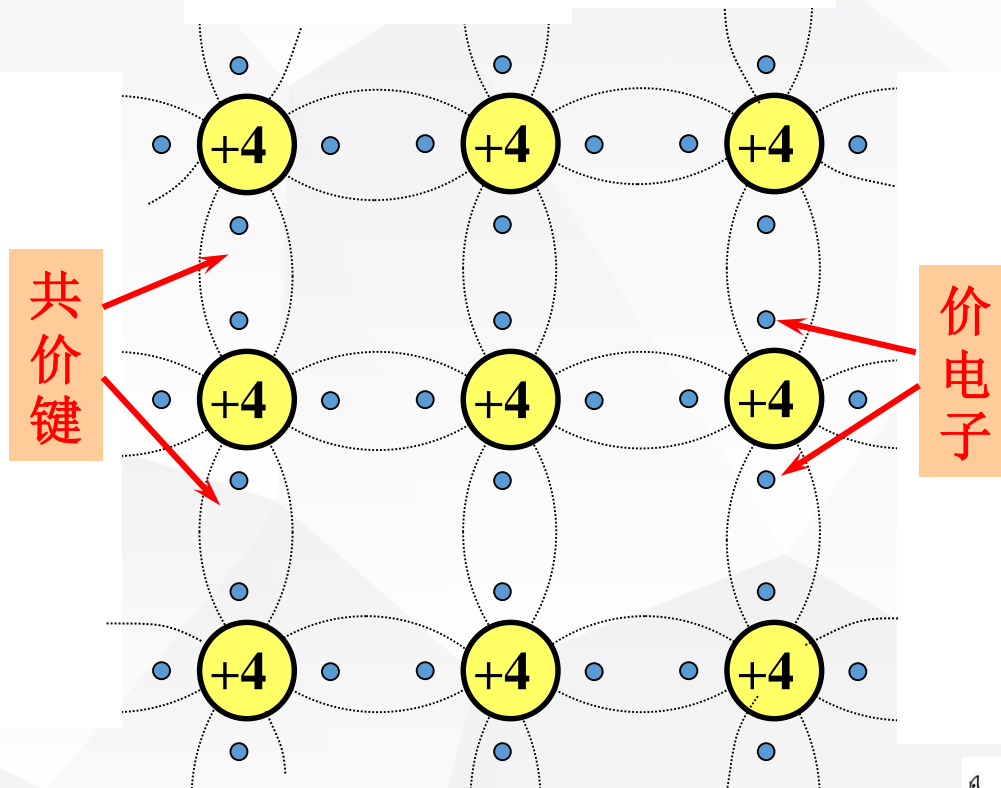
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### 本征半导体的晶体结构

将硅或锗材料提纯便形成单晶体，原子结构为共价键结构

当温度  $T = 0\text{ K}$  时，半导体不导电，如同绝缘体



## 02 半导体二极管与三极管

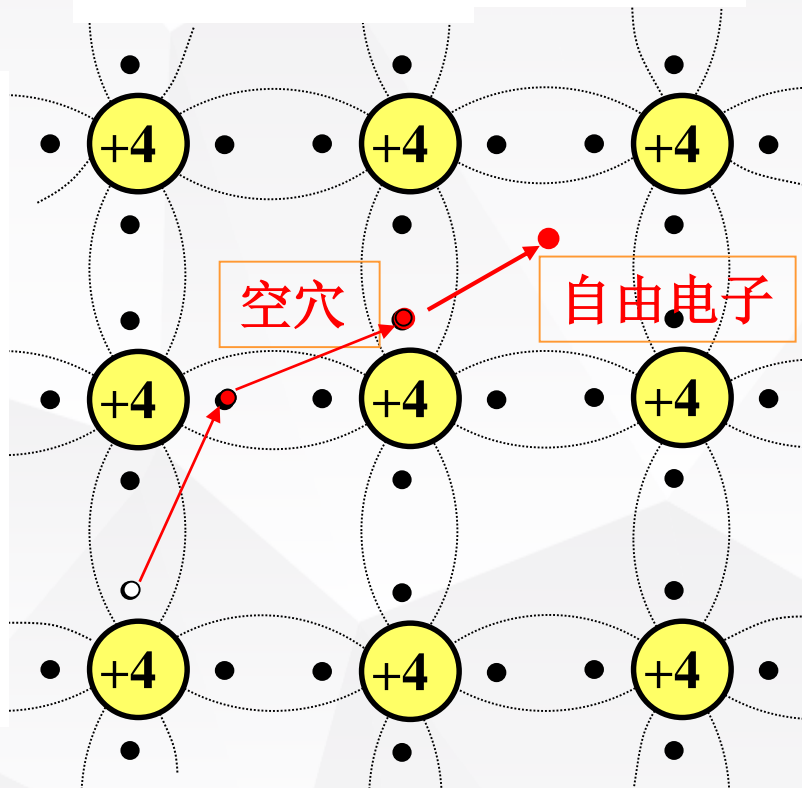
### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### 本征半导体中的两种载流子

若  $T \uparrow$ ，将有少数价电子克服共价键的束缚成为自由电子，在原来的共价键中留下一个空位——**空穴**

自由电子和空穴使本征半导体具有导电能力，但很微弱

**空穴**可看成带正电的载流子



# 02 半导体二极管与三极管

## 2.1 半导体的基础知识及PN结

### 本征半导体中载流子的浓度

本征激发  
复合 } 动态平衡

在一定温度下本征半导体中载流子的浓度是一定的，并且自由电子与空穴的浓度相等

本征半导体中载流子的浓度公式：

$$n_i = p_i = K_1 T^{3/2} e^{-E_{GO}/(2KT)}$$

T=300 K室温下

本征硅的电子和空穴浓度:  $n = p = 1.43 \times 10^{10}/\text{cm}^3$

本征锗的电子和空穴浓度:  $n = p = 2.38 \times 10^{13}/\text{cm}^3$

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### 小结

1. 半导体中两种载流子：自由电子、空穴
2. 本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现，称为 **电子-空穴对**
3. 本征半导体中自由电子和空穴的浓度用  $n_i$  和  $p_i$  表示，显然  **$n_i = p_i$**
4. 由于物质的运动，自由电子和空穴不断的产生又不断的复合。在一定的温度下，产生与复合运动会达到平衡，载流子的浓度就定了
5. 载流子的浓度与温度密切相关，它随着温度的升高，基本**按指数规律增加**

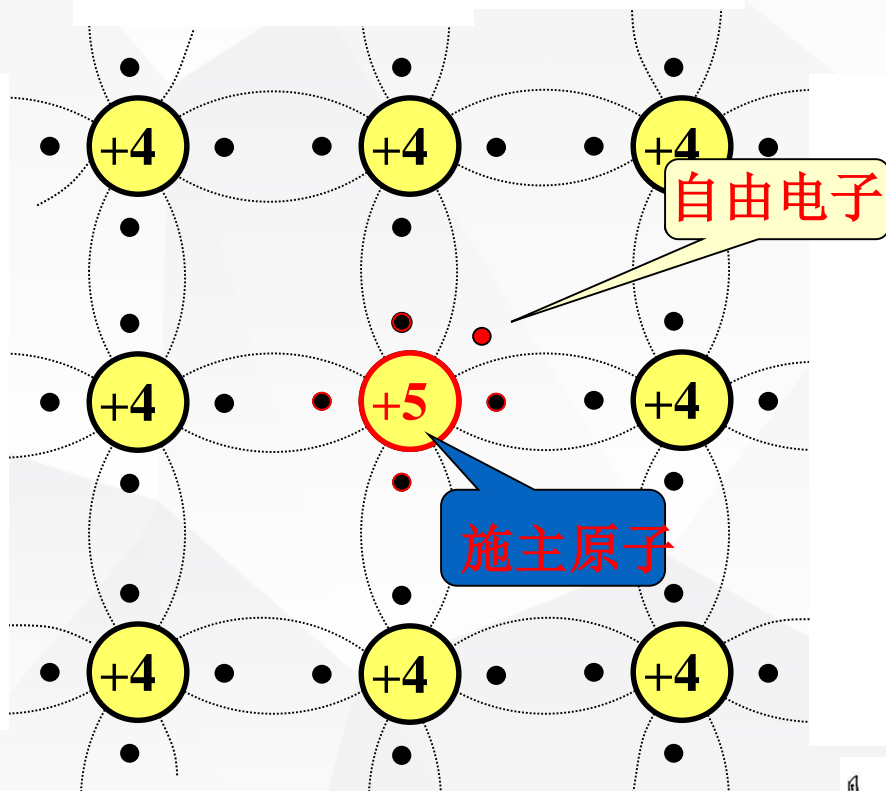
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### N型半导体 ( Negative )

在硅或锗的晶体中掺入少量的 5 价杂质元素，如磷、锑、砷等，即构成 N 型半导体(或称电子型半导体)

常用的 5 价杂质元素有磷、锑、砷等。



N 型半导体



## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

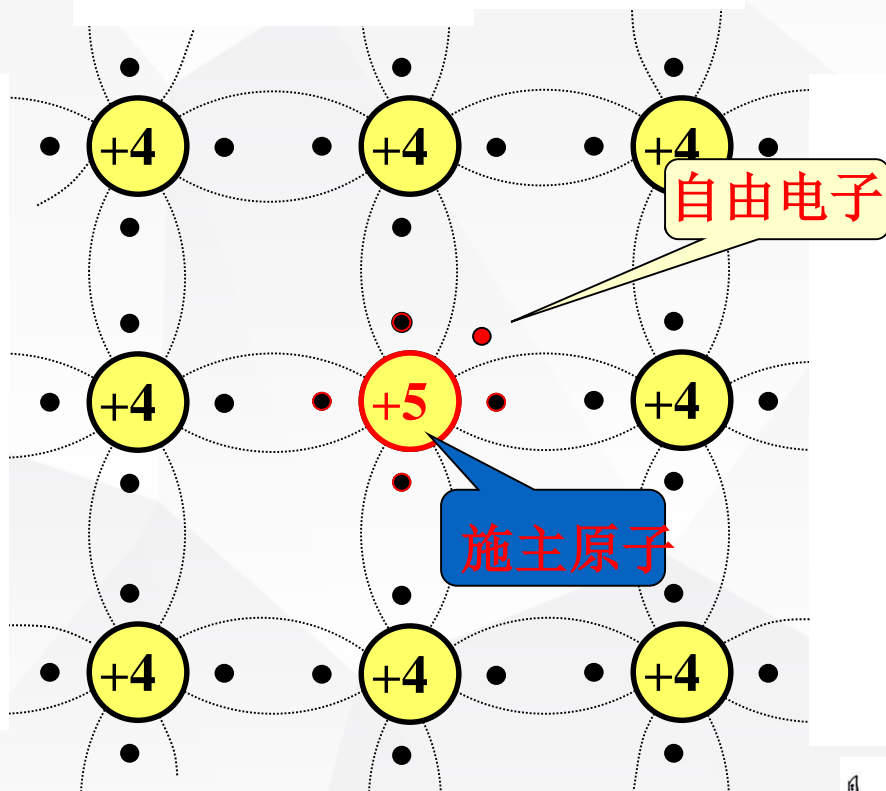
#### N型半导体 ( Negative )

自由电子浓度远大于空穴的浓度, 即  $n \gg p$

电子称为**多数载流子**(简称多子)

空穴称为**少数载流子**(简称少子)

5价杂质原子称为**施主原子**



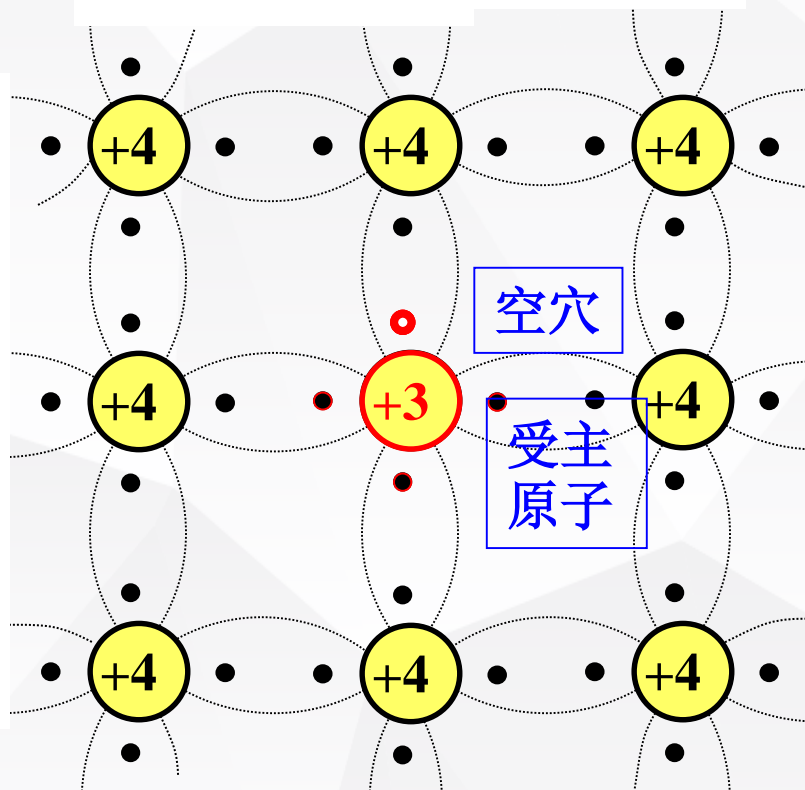
N 型半导体

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### P型半导体 ( Positive )

在硅或锗的晶体中掺入少量的 3 价杂质元素，如硼、镓、铟等，即构成 P 型半导体(或称空穴型半导体)



P 型半导体

# 02 半导体二极管与三极管

## 2.1 半导体的基础知识及PN结

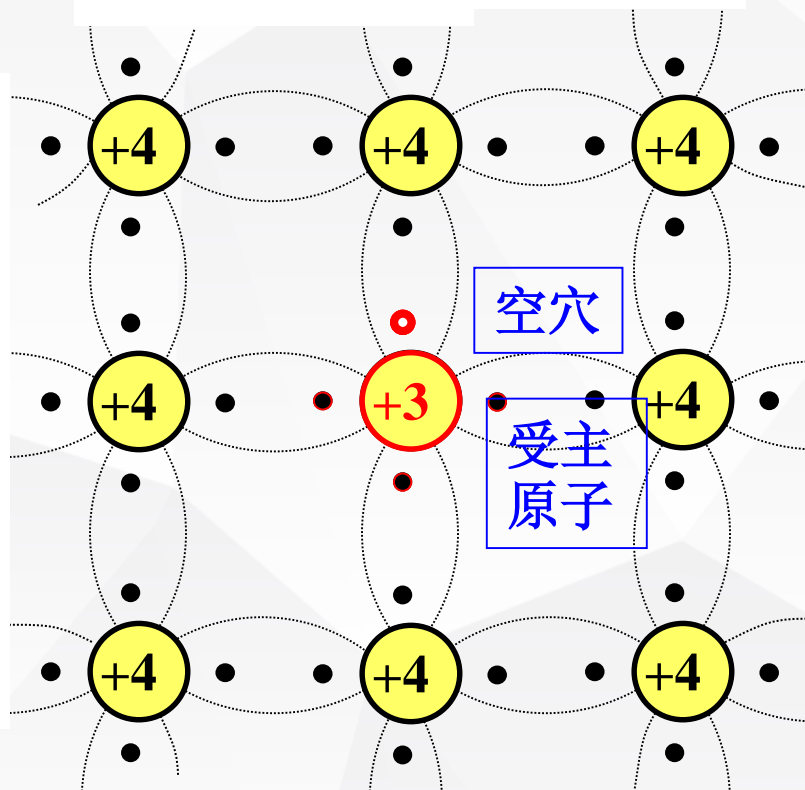
### P型半导体 ( Positive )

空穴浓度远大于自由电子的浓度, 即  $p \gg n$

空穴称为**多数载流子**(简称多子)

电子称为**少数载流子**(简称少子)

3价杂质原子称为**受主原子**



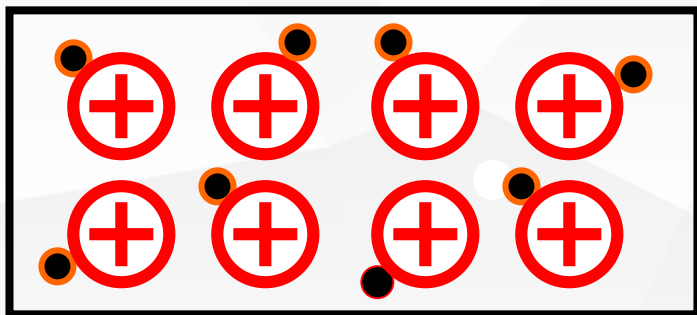
P 型半导体

## 02 半导体二极管与三极管

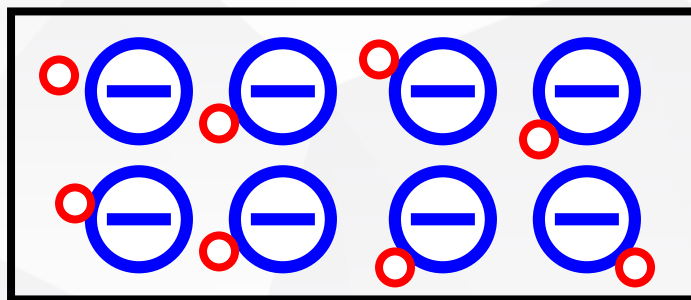
### 2.1 半导体的基础知识及PN结

说明:

1. 掺入杂质的浓度决定多数载流子浓度；温度决定少数载流子的浓度
2. 杂质半导体载流子的数目要远远高于本征半导体，因而其导电能力大大改善
3. 杂质半导体总体上保持电中性
4. 杂质半导体的表示方法如下图所示



N 型半导体



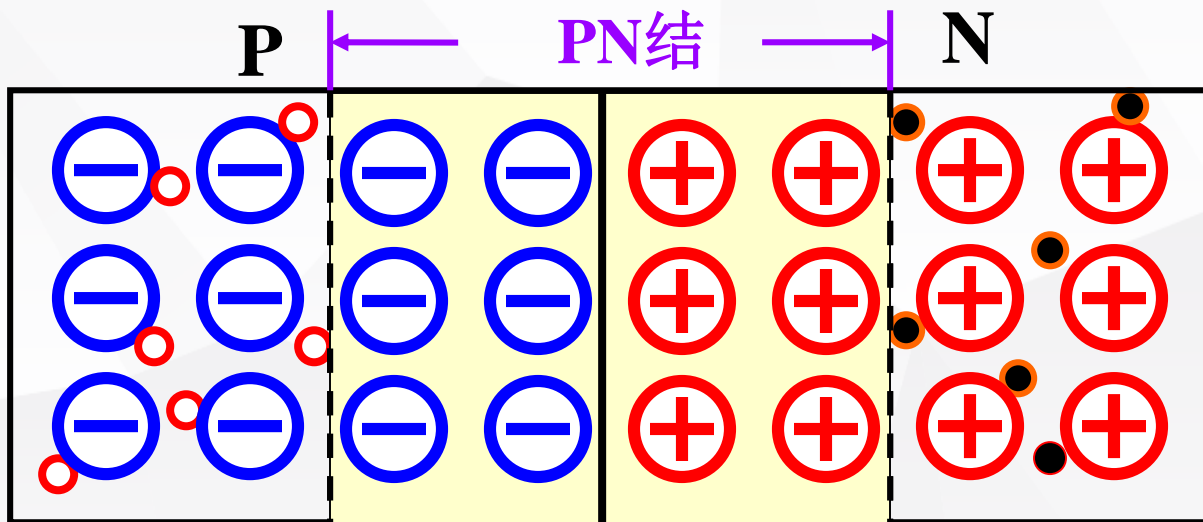
P 型半导体

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### PN 结的形成

在一块半导体单晶上一侧掺杂成为 P 型半导体，另一侧掺杂成为 N 型半导体，两个区域的交界处就形成了一个特殊的薄层，称为 **PN 结**



PN 结的形成

## 02 半导体二极管与三极管

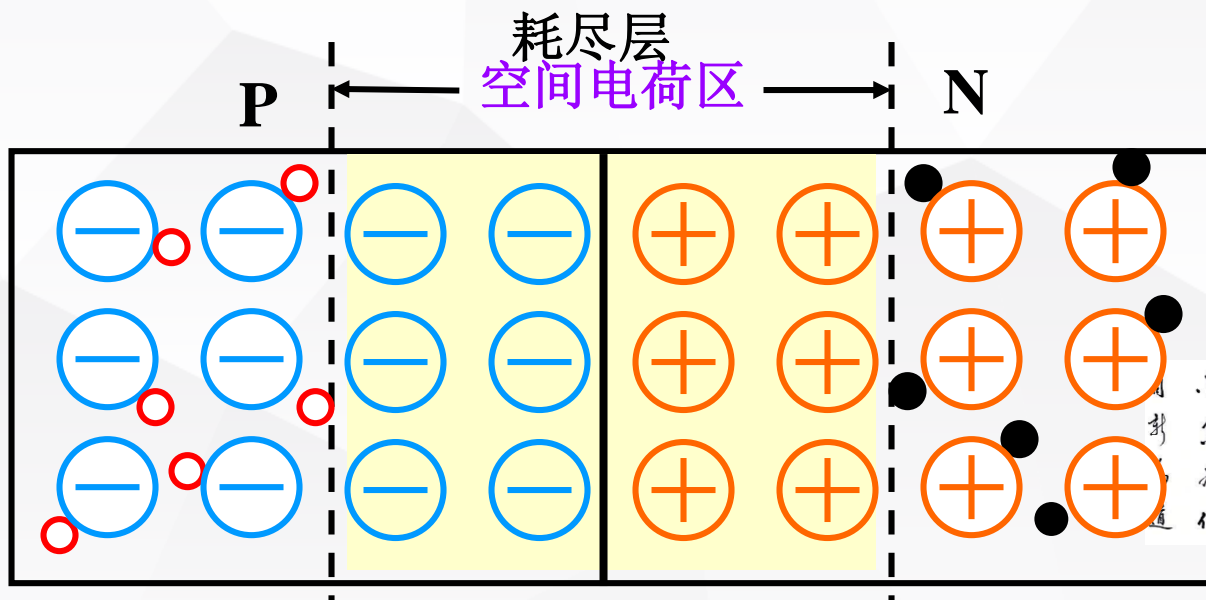
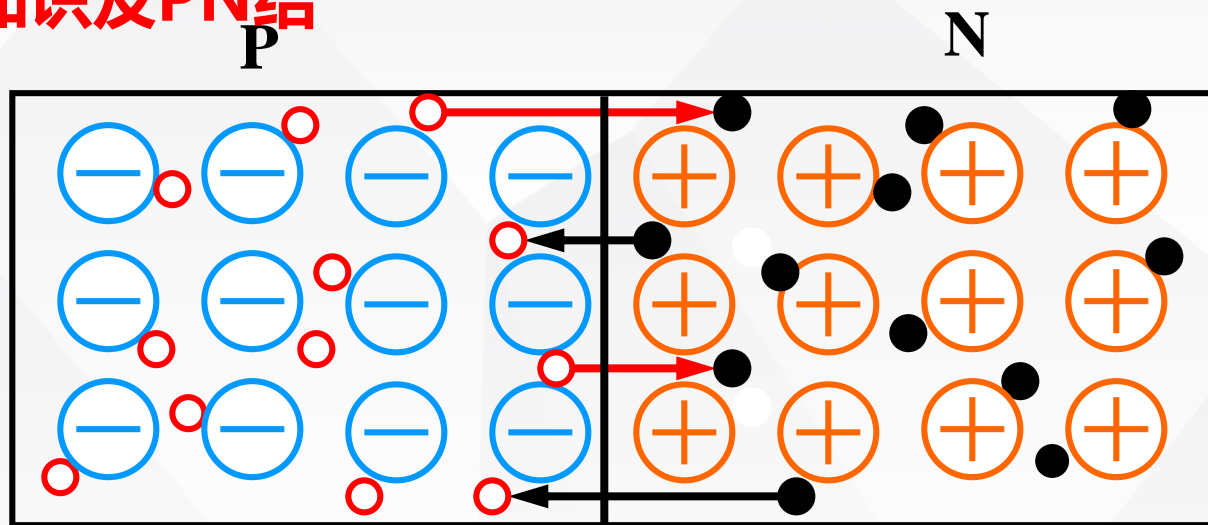
### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### 载流子的运动

1. 扩散运动-电子和空穴浓度差形成多数载流子的扩散运动。

形成内电场，空间电荷区，PN结，耗尽层

2. 漂移运动-内电场促进少子漂移运动



## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

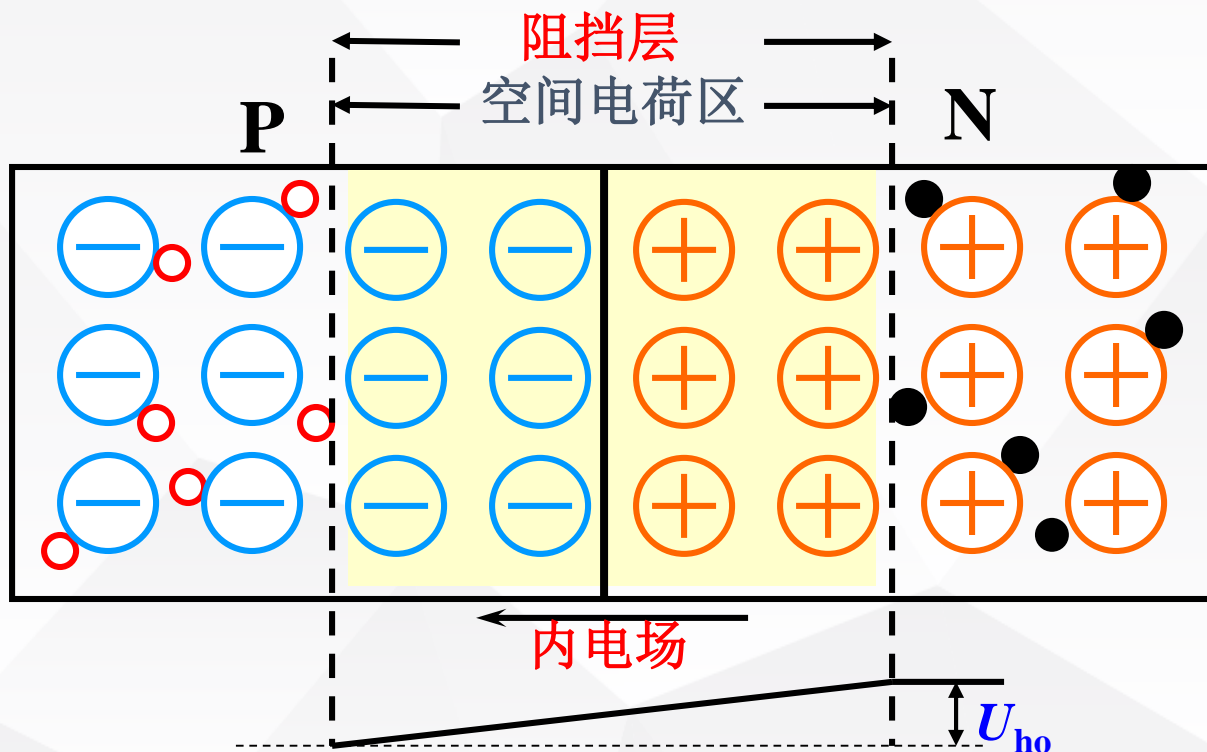
#### PN结

空间电荷区产生内电场

内电场阻止多子的扩散，加速少子的漂移

少子的运动与多子运动方向相反

2. 漂移运动-内电场促进少子漂移运动



## 02 半导体二极管与三极管

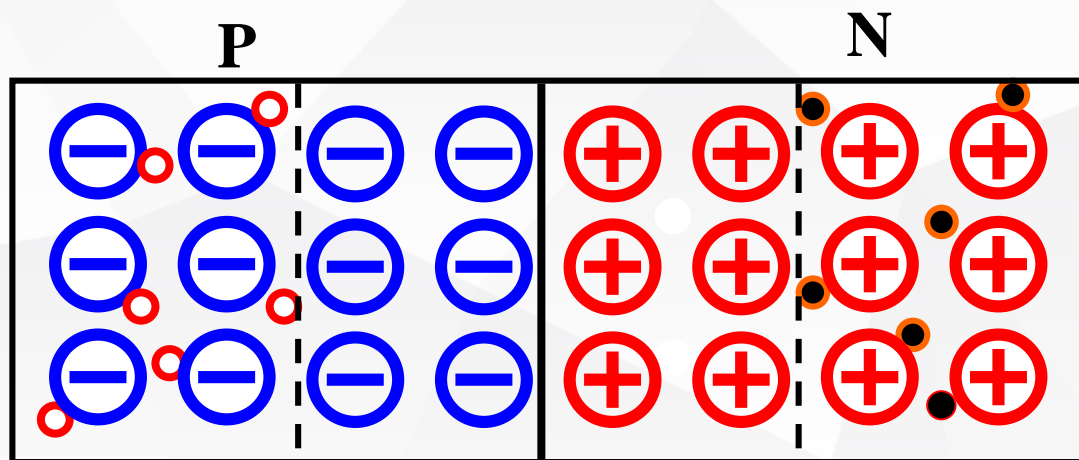
### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### 扩散与漂移的动态平衡

扩散运动使空间电荷区增大，扩散电流逐渐减小

随着内电场的增强，漂移运动逐渐增加

当扩散电流与漂移电流相等时，PN结总的电流等于零，空间电荷区的宽度达到稳定。扩散运动与漂移运动达到动态平衡



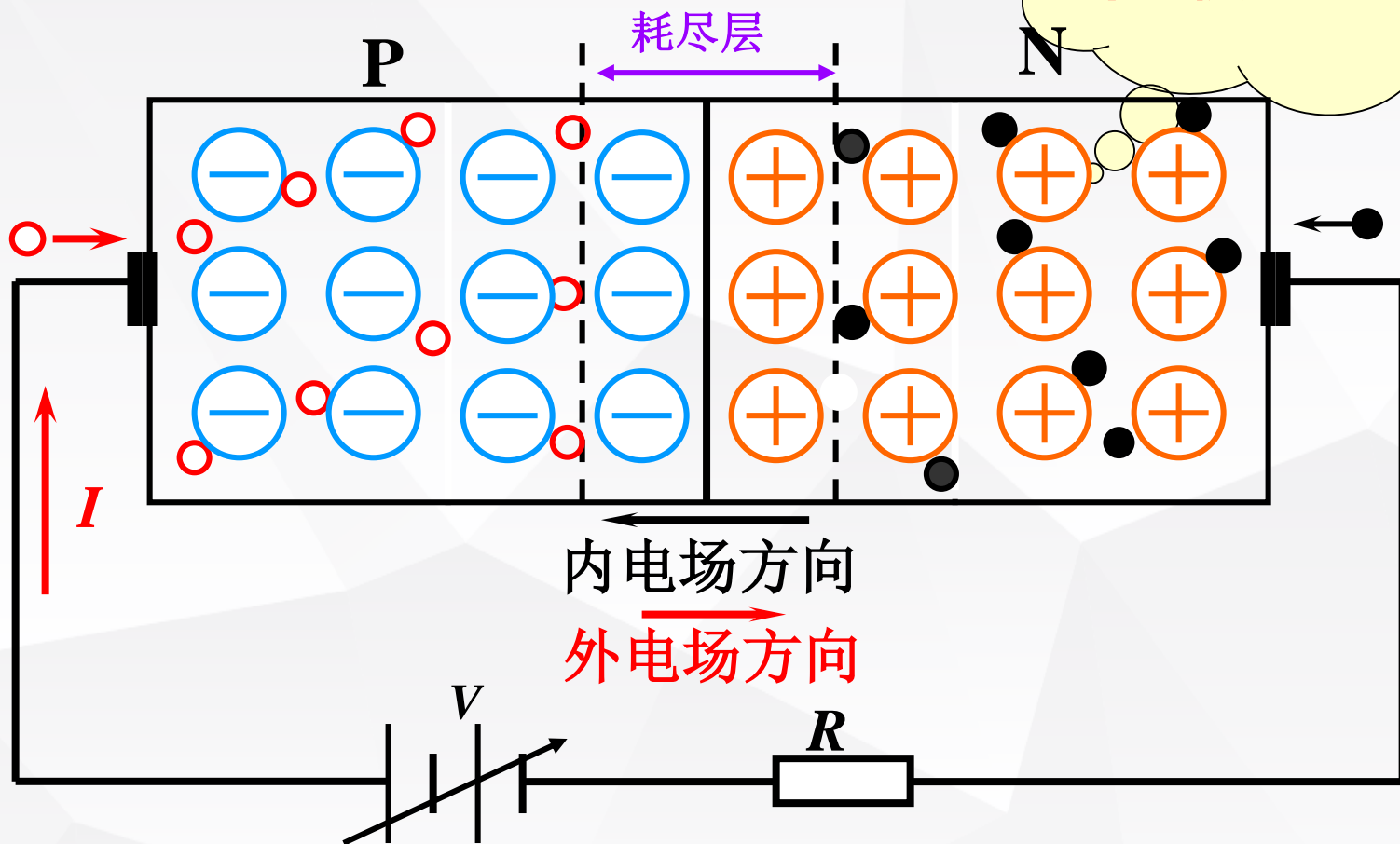


## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### PN结的单向导电性

##### 1. PN结 外加正向电压（又称正向偏置或正偏）



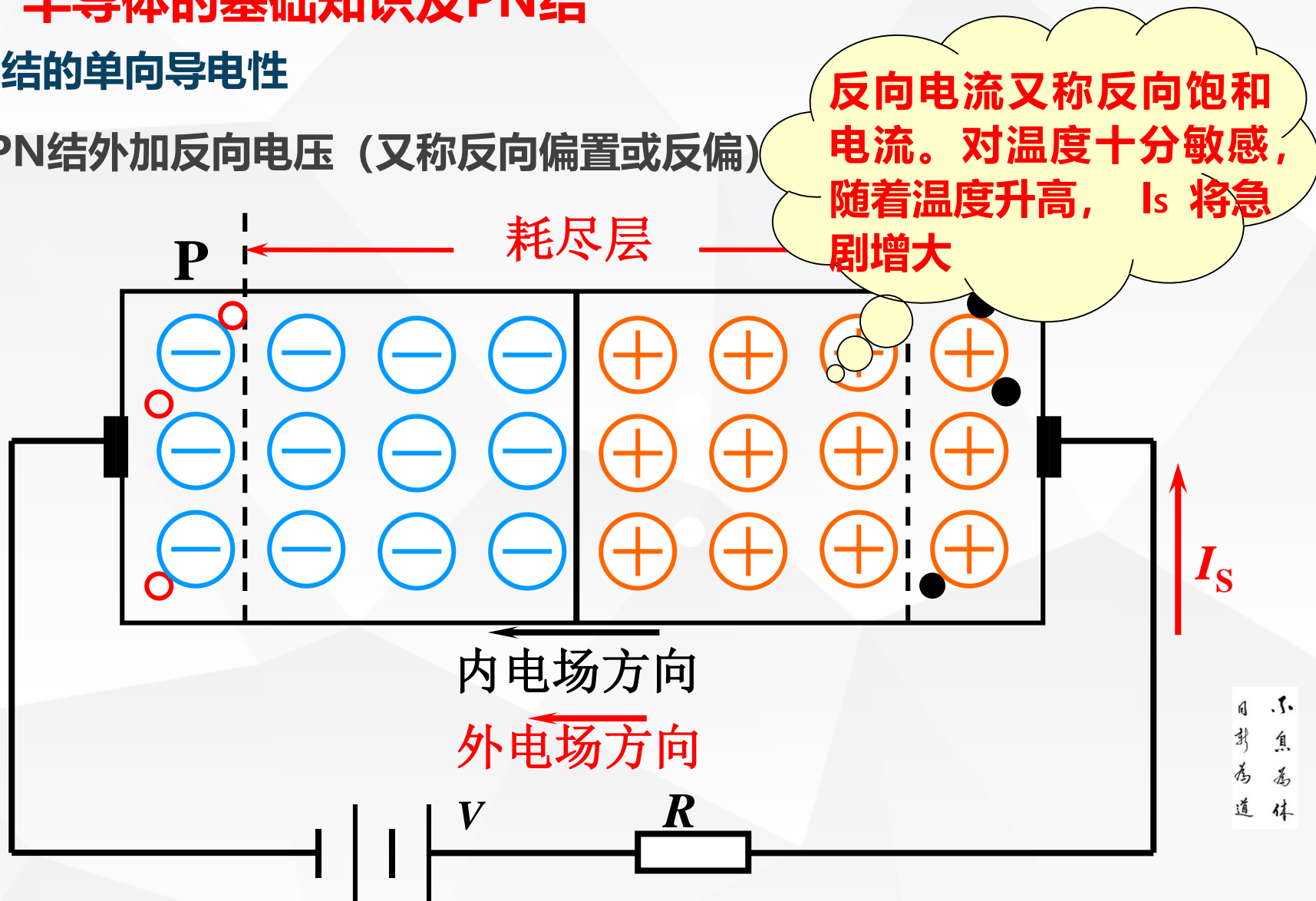
空间电荷区变窄，有利于扩散运动，电路中有较大的正向电流

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### PN结的单向导电性

#### 2. PN结外加反向电压（又称反向偏置或反偏）



### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### PN结的单向导电性

总结：

- 1. 正偏：**在 PN 结加上一个很小的正向电压 ( $> U_{ho}$ )，即可得到较大的正向电流，为防止电流过大，可接入电阻 R
- 2. 反偏：**反向接法时，外电场与内电场的方向一致，增强了内电场的作用；外电场使空间电荷区变宽，不利于扩散运动，有利于漂移运动，漂移电流大于扩散电流，电路中产生反向电流  $I_s$ ；由于少数载流子浓度很低，反向电流数值非常小 ( $\mu A$ )

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### PN结的电流方程

PN结所加端电压 $u$ 与流过的电流 $i$ 的关系为:

$$i = I_S (e^{q u / k t} - 1)$$

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

$I_S$  : 反向饱和电流

$U_T$  : 温度的电压当量

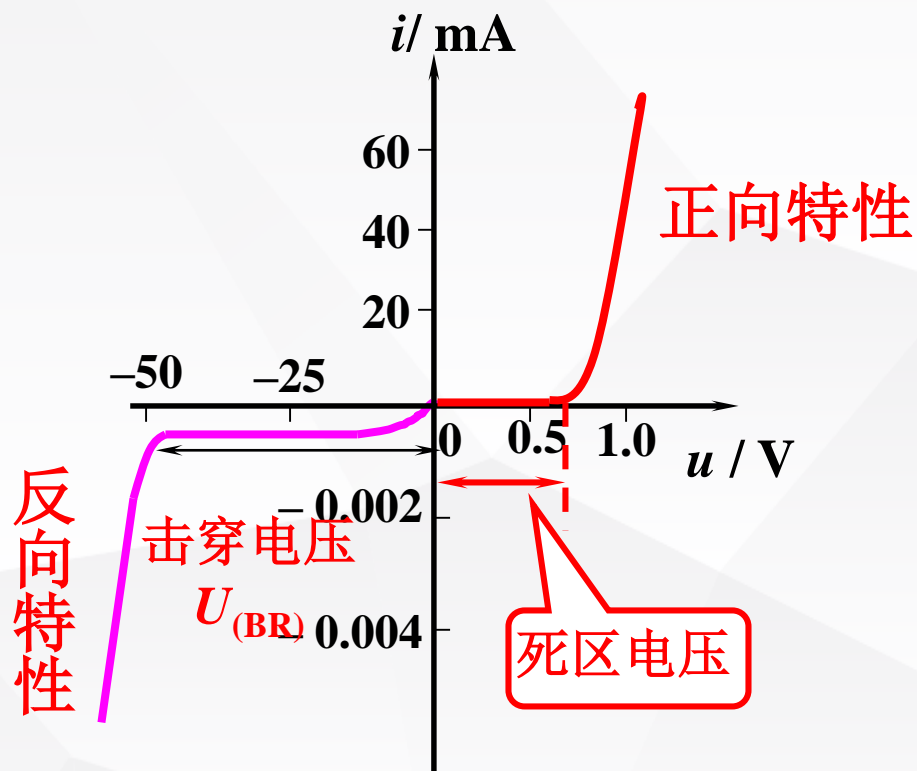
在常温(300 K)下,  $U_T \approx 26 \text{ mV}$

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

#### PN结的伏安特性

PN结所加端电压 $u$ 与流过的电流 $i$ 的关系为:



反向击穿  
齐纳击穿  
雪崩击穿

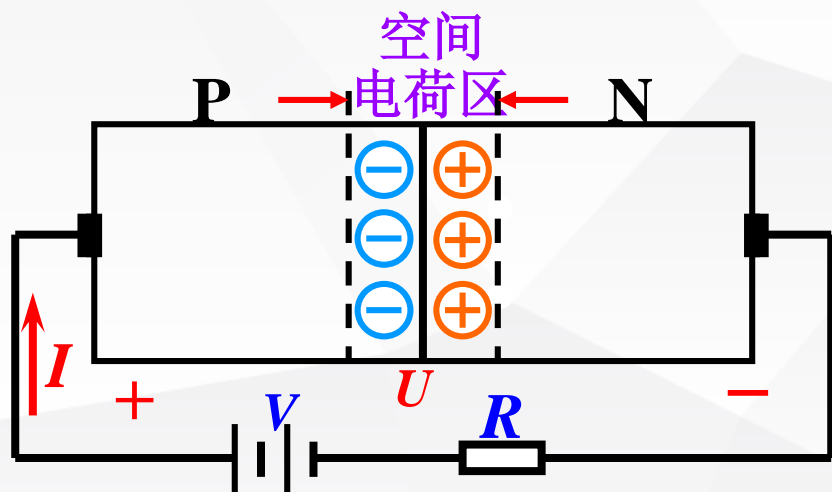
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.1 半导体的基础知识及PN结

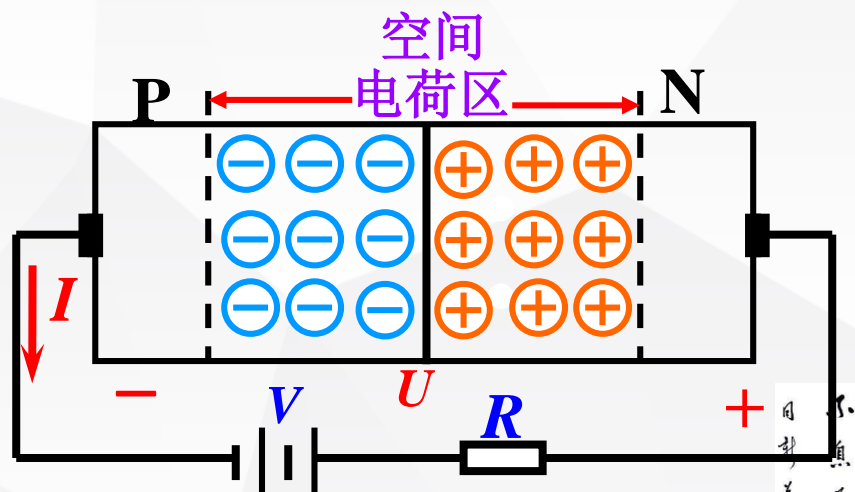
#### PN结的电容效应

当PN上的电压发生变化时，PN 结中储存的电荷量将随之发生变化，使PN 结具有电容效应

**势垒电容、扩散电容：**通常为几个皮法 ~ 几十皮法，有些结面积大的二极管可达几百皮法。在信号频率较高时，须考虑结电容的作用



(a) PN 结加正向电压

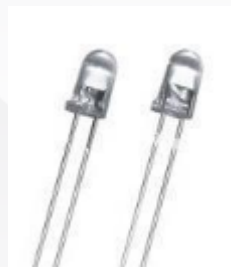


(b) PN 结加反向电压

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.2 半导体二极管

在PN结上加上引线和封装，就成为一个二极管。二极管按结构分有点接触型、面接触型和平面型



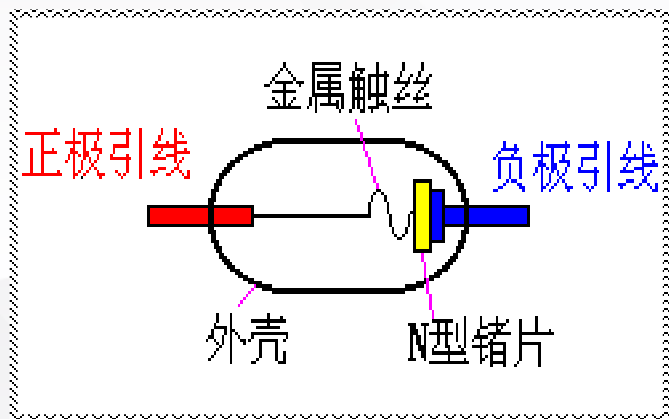
不負為道

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.2 半导体二极管

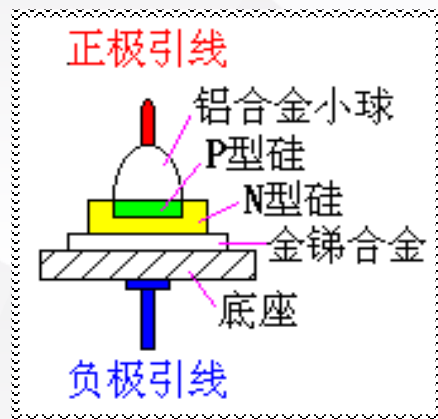
#### 点接触型二极管

PN结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路



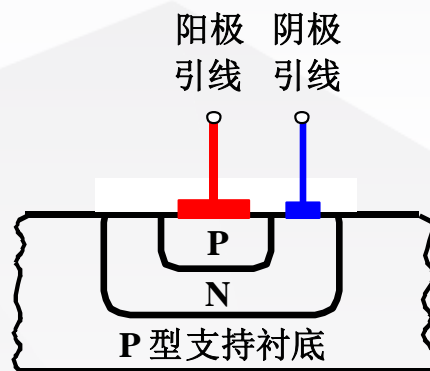
#### 面接触型二极管

PN结面积大，用于工频大电流整流电路



#### 平面型二极管

往往用于集成电路制造工艺中。PN结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中



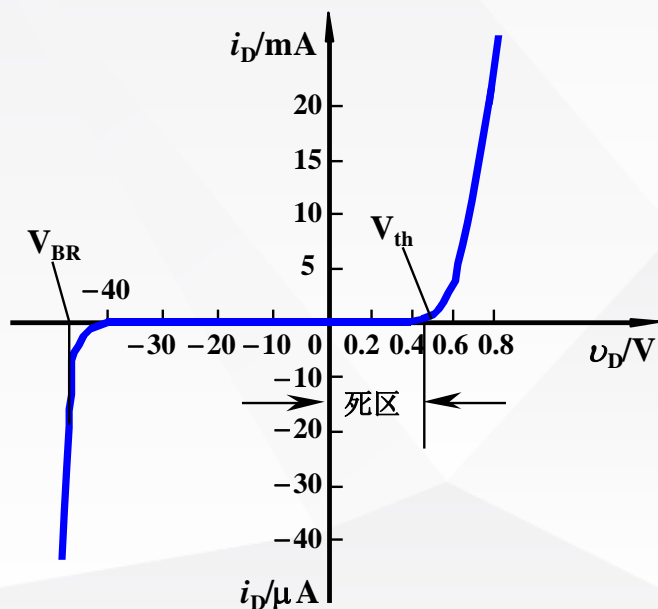
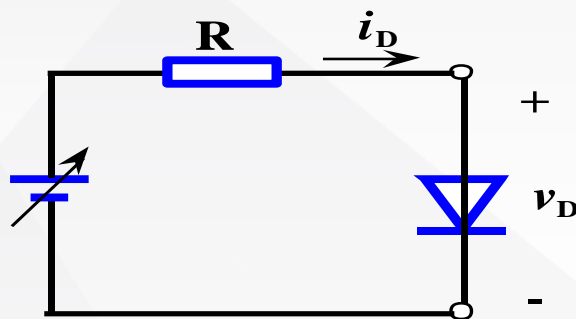


## 02 半导体二极管与三极管

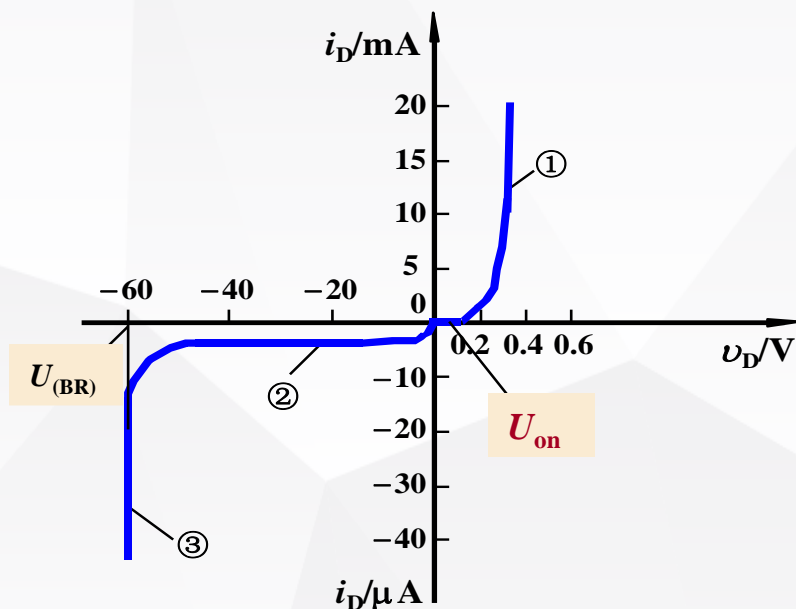
### 2.2 半导体二极管

#### 二极管的伏安特性

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



硅二极管2CP10的伏安特性

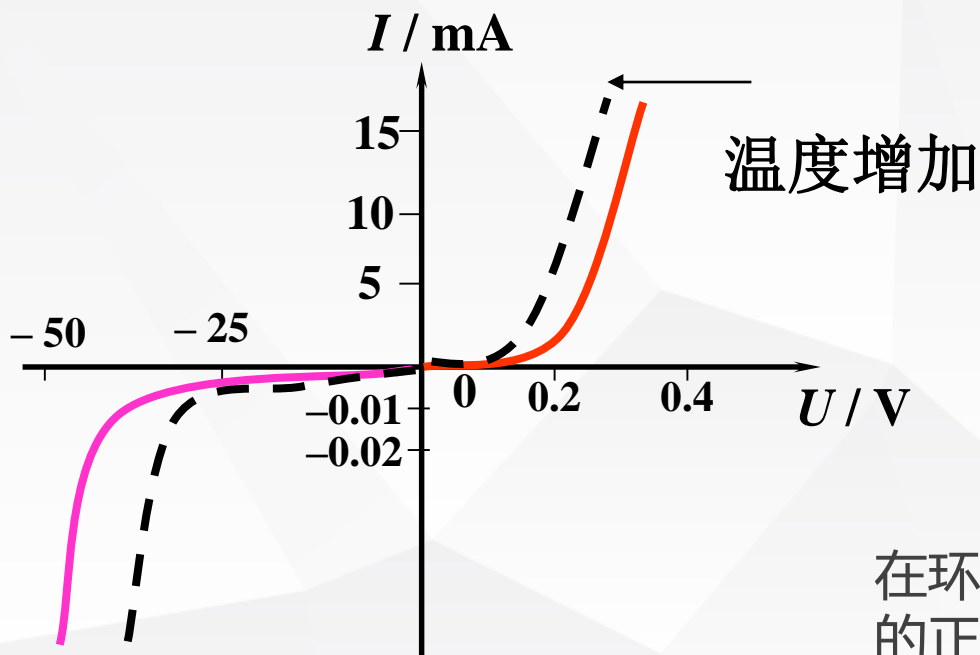


锗二极管2AP15的伏安特性

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.2 半导体二极管

#### 温度对二极管伏安特性的影响



在环境温度升高时，二极管的正向特性将左移，反向特性将下移。--负温度系数

### 2.2 半导体二极管

#### 二极管的参数

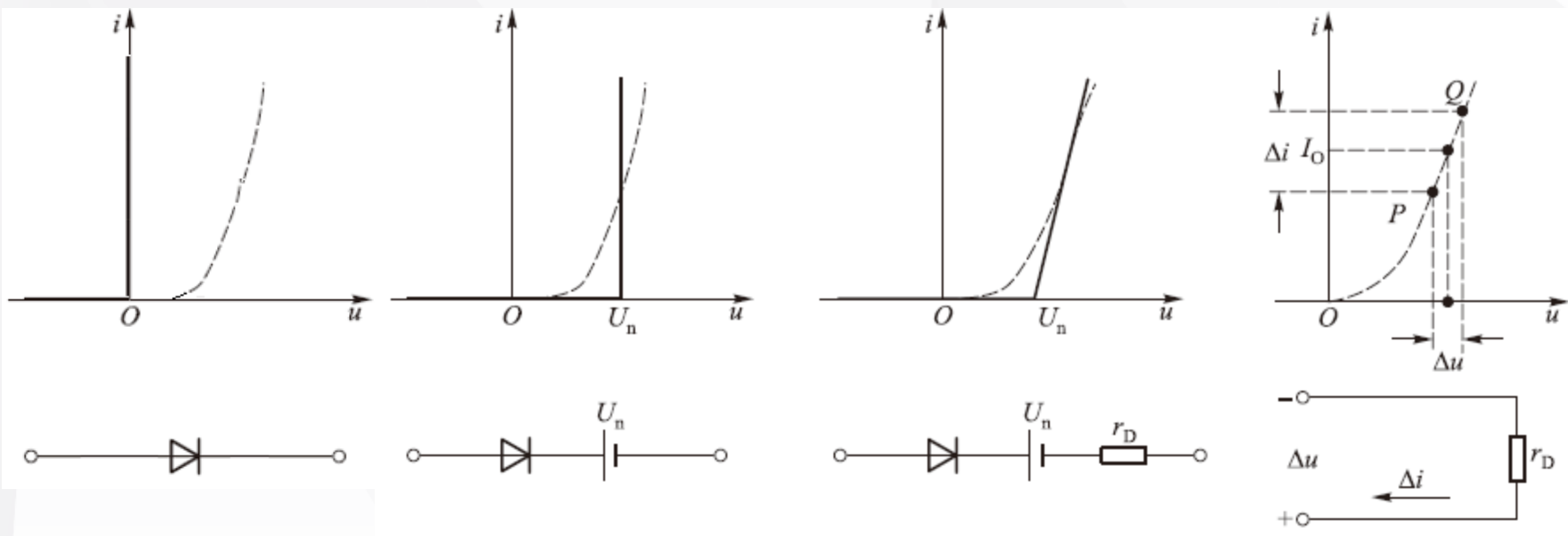
- (1) 最大整流电流 $I_F$
- (2) 反向击穿电压 $U_{BR}$ 和最高反向工作电压 $U_{RM}$
- (3) 反向电流 $I_R$
- (4) 最高工作频率 $f_M$
- (5) 极间电容 $C_j$

在实际应用中，应根据管子所用的场合，按其所承受的最高反向电压、最大正向平均电流、工作频率、环境温度等条件，选择满足要求的二极管

# 02 半导体二极管与三极管

## 2.2 半导体二极管

### 二极管的等效电路



理想模型

恒压降模型

折线模型

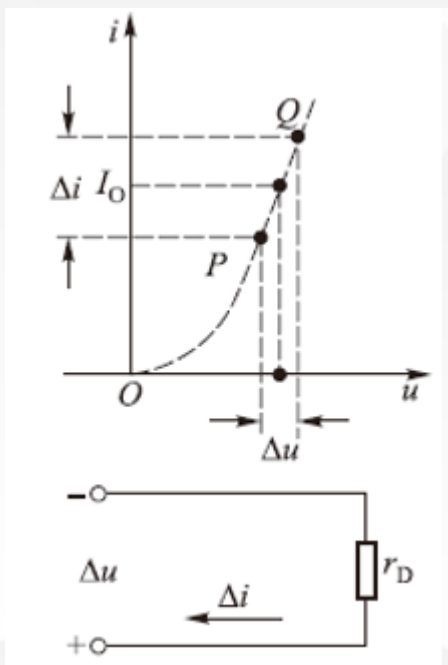
小信号模型

不  
息  
为  
道  
体

# 02 半导体二极管与三极管

## 2.2 半导体二极管

### 二极管的小信号模型



常温下 ( $T=300K$ )

$$r_D = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26 \text{ (mV)}}{I_D \text{ (mA)}}$$

# 02 半导体二极管与三极管

## 2.2 半导体二极管

### 二极管的静态工作情况分析

例1:  $V_{DD}=10\text{V}$  时 ( $R=10\text{k}\Omega$ )

理想模型

$$V_D = 0\text{V} \quad I_D = V_{DD} / R = 1\text{mA}$$

恒压模型

$$V_D = 0.7\text{V} \quad (\text{硅二极管典型值})$$

$$I_D = (V_{DD} - V_D) / R = 0.93\text{mA}$$

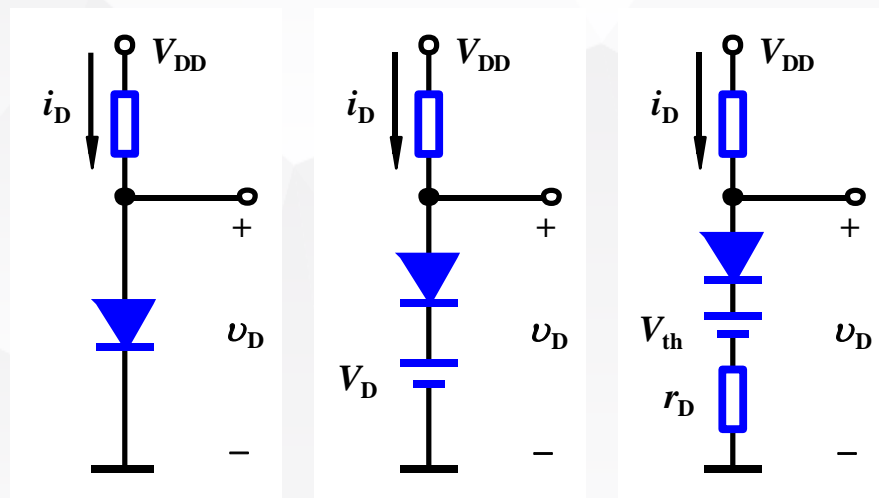
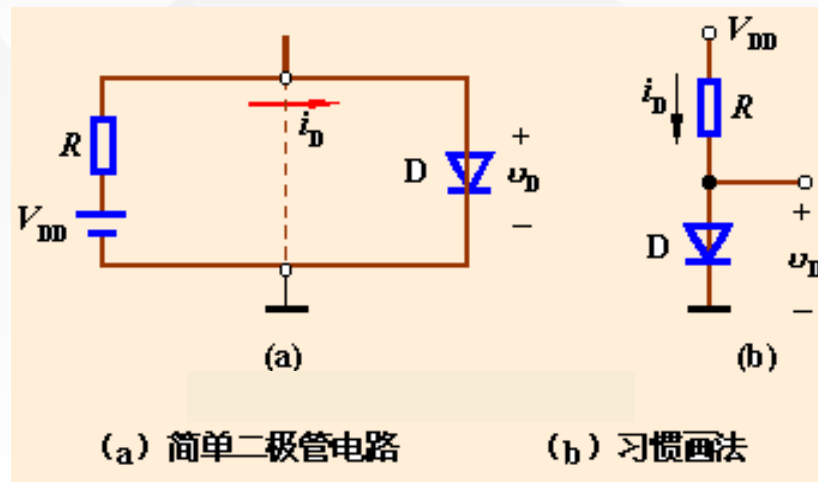
折线模型

$$V_{th} = 0.5\text{V} \quad (\text{硅二极管典型值})$$

设  $r_D = 0.2\text{k}\Omega$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.931\text{mA}$$

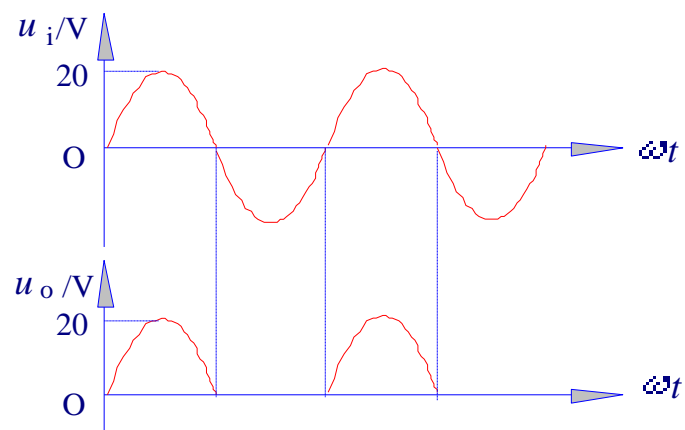
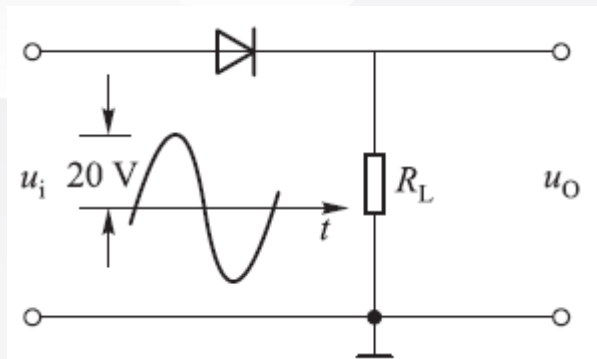
$$V_D = V_{th} + I_D r_D = 0.69\text{V}$$



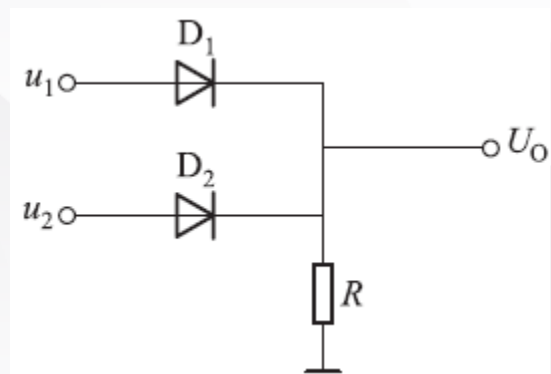
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.2 半导体二极管

例2:



例3: 已知由二极管组成的门电路如图所示, 请证明只有输入  $u_1$ 、 $u_2$  均为低电平 (以 0 表示) 输入  $u_o$  才为低电平零, 其他  $U_1$ 、 $U_2$  的任何组合, 输出均为高电平 (以 1 表示)



## 02 半导体二极管与三极管

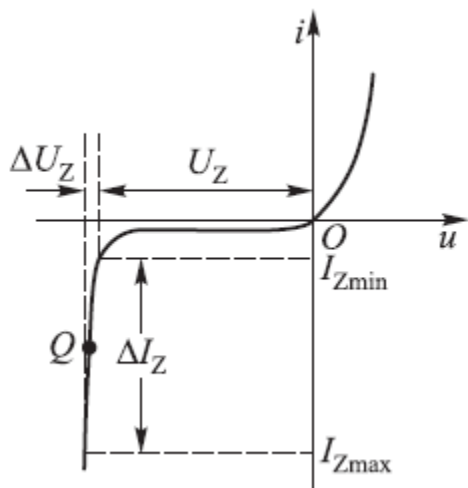
### 2.3 特殊二极管

#### 稳压管的伏安特性

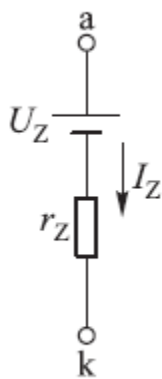
利用二极管反向击穿特性实现稳压，稳压二极管稳压时工作在反向电击穿状态，反向电压应大于稳压电压



符号



伏安特性图



等效模型

$$r_Z = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (\text{通常为几欧} \sim \text{几十欧姆})$$



### 2.3 特殊二极管

#### 稳压管的主要参数

##### (1) 稳定电压 $U_Z$

在规定的稳压管反向工作电流  $I_Z$  下，所对应的反向工作电压

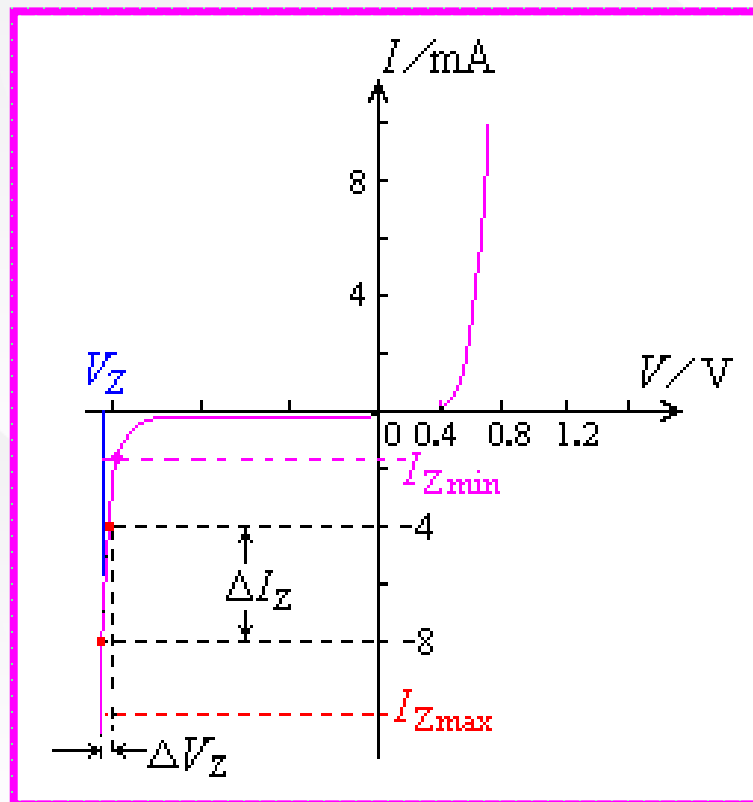
##### (2) 动态电阻 $r_Z$

$$r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$$

##### (3) 最大耗散功率 $P_{ZM}$

(4) 最大稳定工作电流  $I_{Zmax}$  和最小稳定工作电流  $I_{Zmin}$

##### (5) 温度系数 $\alpha_{VZ}$



## 02 半导体二极管与三极管

### 2.3 特殊二极管

#### 稳压电路工作原理

正常稳压时  $U_o = U_z$

(1) 设电源电压波动(负载不变)

$$U_i \uparrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow U_z \uparrow \rightarrow I_z \uparrow$$

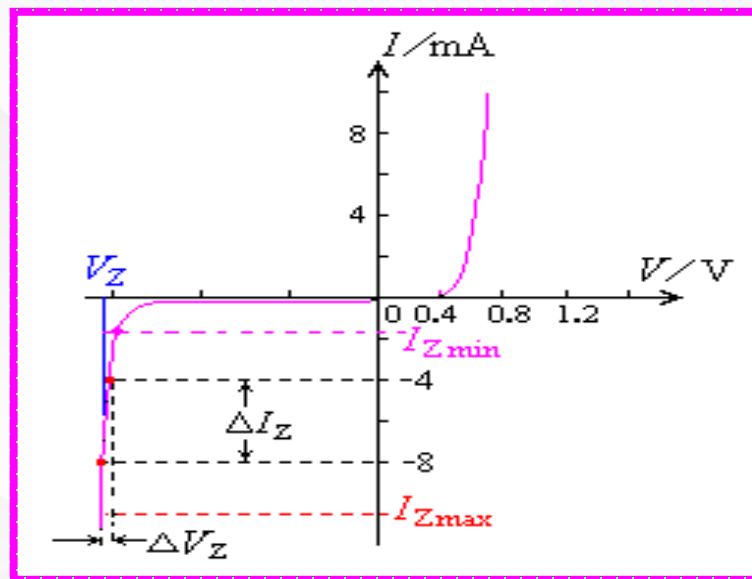
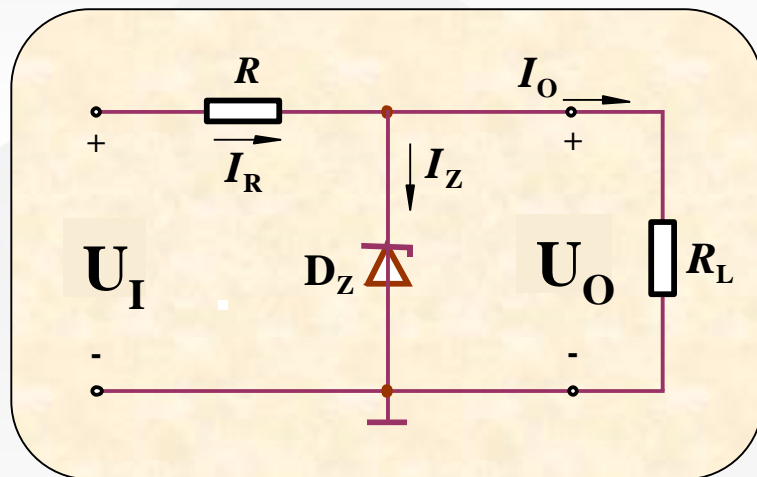
↓

$$U_o \downarrow \leftarrow U_R \uparrow \leftarrow I_R \uparrow$$

(2) 设负载变化(电源不变) 略

? 上述电路 $U_i$ 为正弦波, 且幅值大于 $U_z$ ,  $U_o$ 的波形是怎样的?

? 不加 $R$ 可以吗?



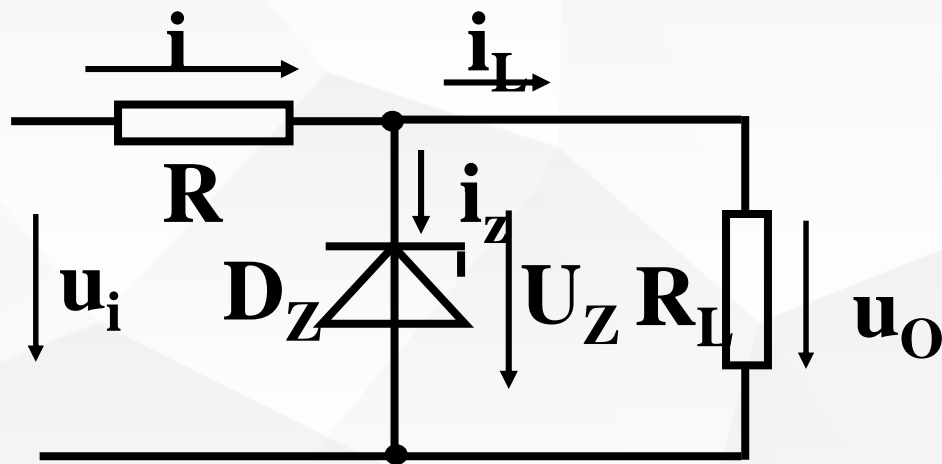
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.3 特殊二极管

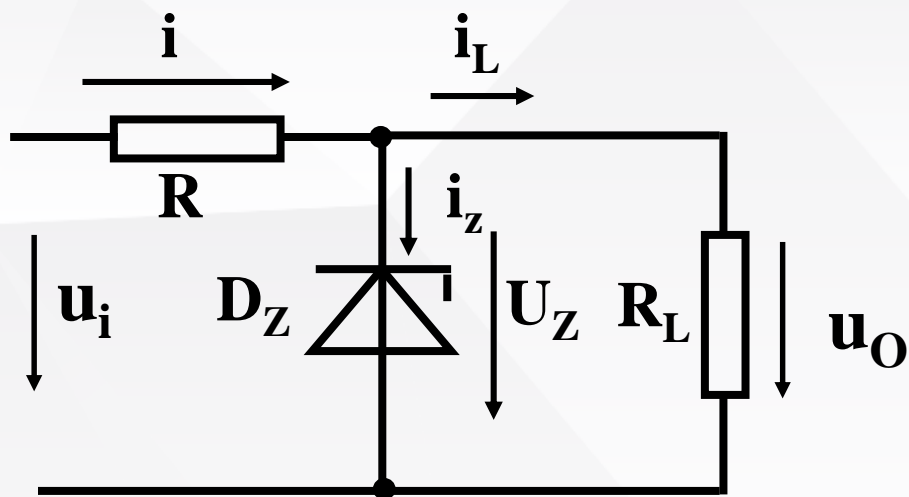
#### 稳压电路工作原理

**例：**稳压二极管技术数据为：稳压值 $U_Z=10\text{V}$ ， $I_{Z\max}=12\text{mA}$ ， $I_{Z\min}=2\text{mA}$ ，负载电阻 $R_L=2\text{k}\Omega$ ，输入电压 $u_i=12\text{V}$ ，限流电阻 $R=200\ \Omega$ ，求 $i_z$ 。

若负载电阻变化范围为 $1.5\ \text{k}\Omega \sim 4\ \text{k}\Omega$ ，是否还能稳压？



## 02 半导体二极管与三极管



$$U_Z = 10\text{V} \quad u_i = 12\text{V}$$

$$R = 200\ \Omega$$

$$I_{z\max} = 12\text{mA} \quad I_{z\min} = 2\text{mA}$$

$$R_L = 2\text{k}\Omega \quad (1.5\text{ k}\Omega \sim 4\text{ k}\Omega)$$

$$i_L = u_o / R_L = U_Z / R_L = 10 / 2 = 5 \text{ (mA)}$$

$$i = (u_i - U_Z) / R = (12 - 10) / 0.2 = 10 \text{ (mA)}$$

$$i_z = i - i_L = 10 - 5 = 5 \text{ (mA)}$$

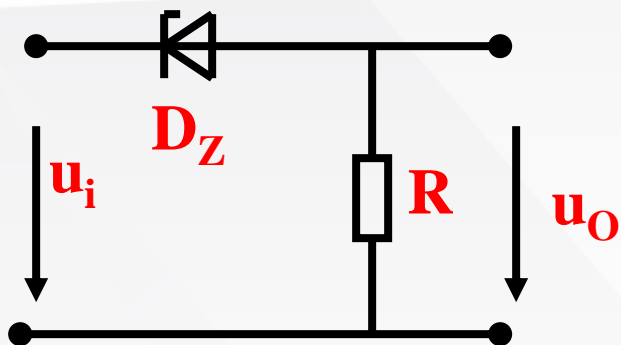
$$R_L = 1.5\text{ k}\Omega, i_L = 10 / 1.5 = 6.7 \text{ (mA)}, i_z = 10 - 6.7 = 3.3 \text{ (mA)}$$

$$R_L = 4\text{ k}\Omega, i_L = 10 / 4 = 2.5 \text{ (mA)}, i_z = 10 - 2.5 = 7.5 \text{ (mA)}$$

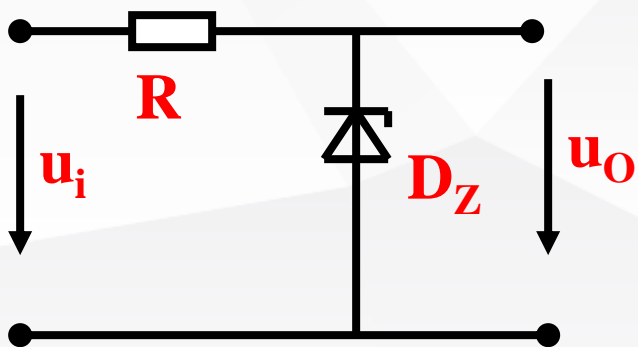
负载变化,但 $i_z$ 仍在12mA和2mA之间,所以稳压管仍能起稳压作用

## 02 半导体二极管与三极管

$$(U_Z = 3V)$$

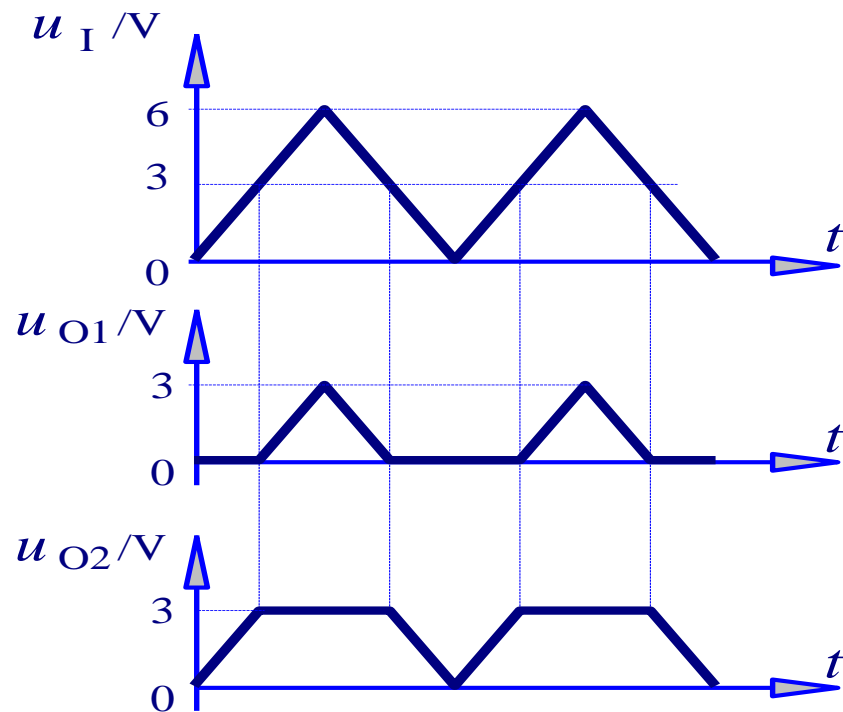


(a)



(b)

解:  $u_i$  和  $u_o$  的波形如图所示



## 02 半导体二极管与三极管

### 2.3 特殊二极管

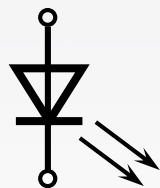
#### 其它类型的二极管

##### 一、发光二极管 LED (Light Emitting Diode)

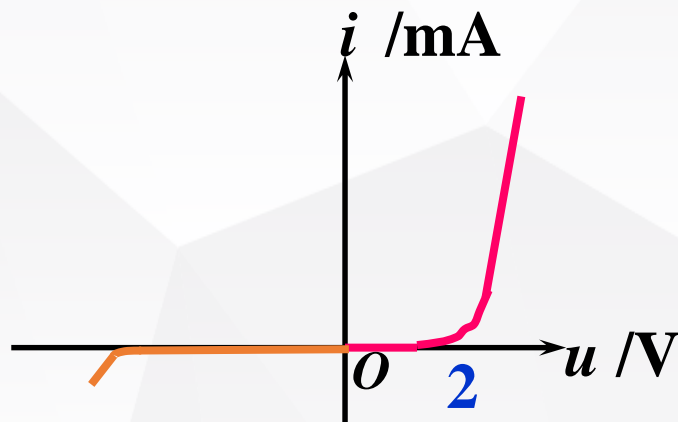
##### 1. 符号和特性

工作条件：正向偏置

一般工作电流几十 mA，  
导通电压 (1 ~ 2) V



符号



特性

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.3 特殊二极管

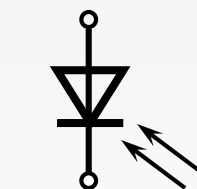
#### 二、光电二极管

工作原理： 无光照时，与普通二极管一样  
有光照时，分布在第三、四象限

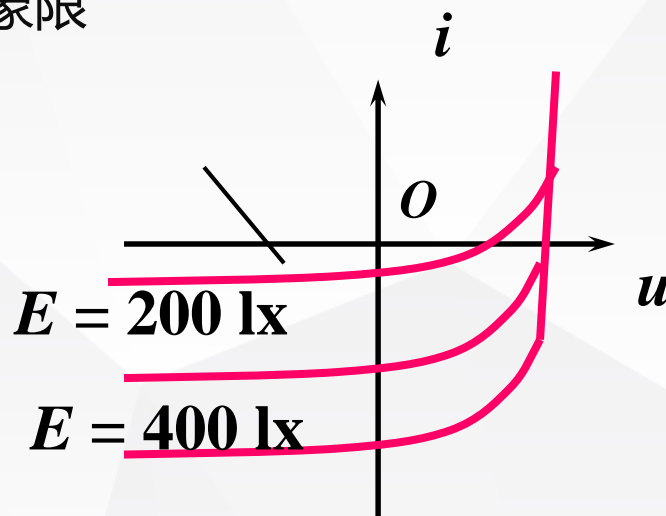
三、变容二极管

四、隧道二极管

五、肖特基二极管



符号



特性

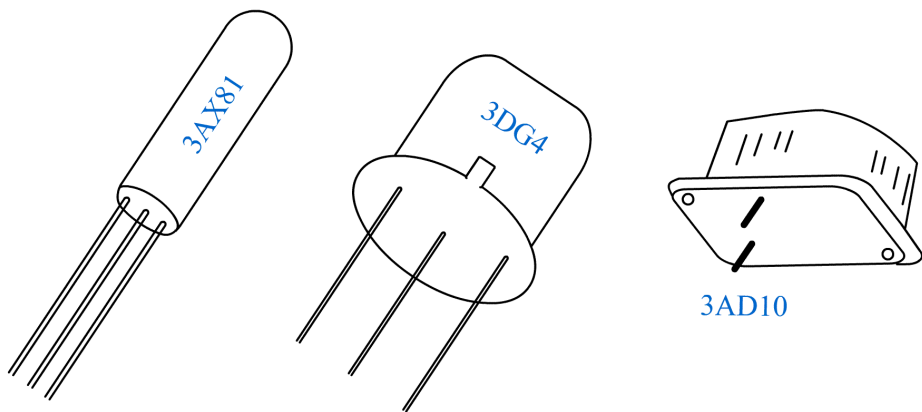
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

又称半导体三极管、晶体三极管，或简称晶体管

**(Bipolar Junction Transistor)**

三极管的外形如下图所示



**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

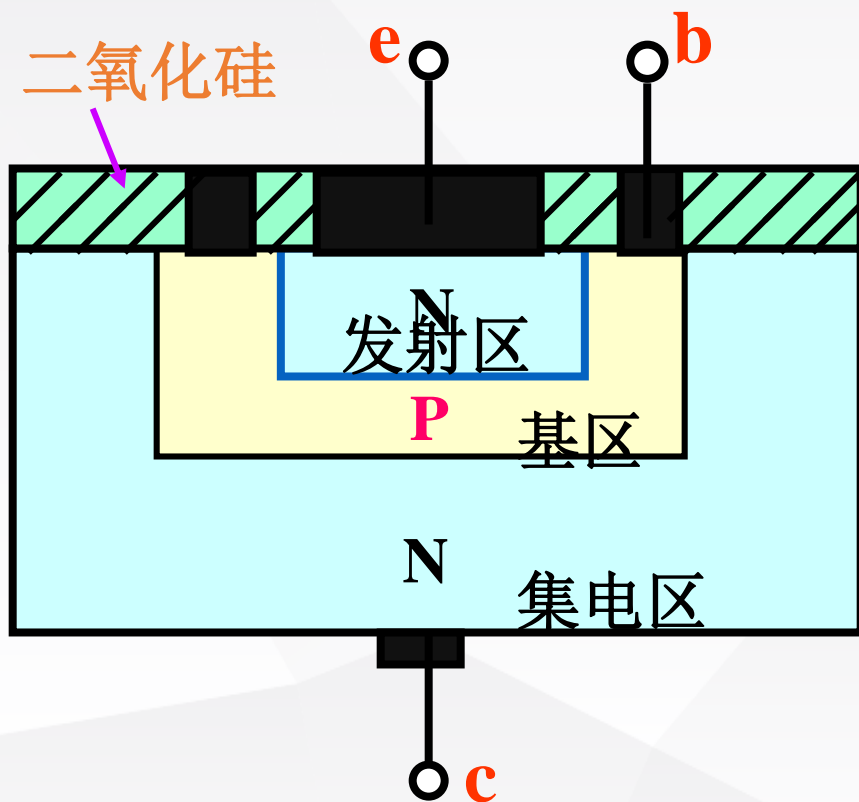
三极管有两种类型：**NPN** 型和 **PNP** 型  
主要以 NPN 型为例进行讨论



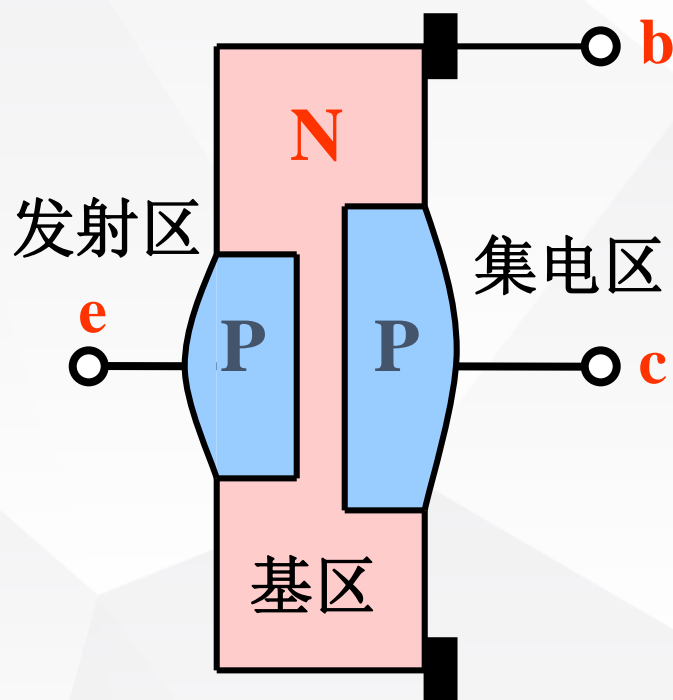
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

晶体管的结构及类型：硅平面管和锗合金管



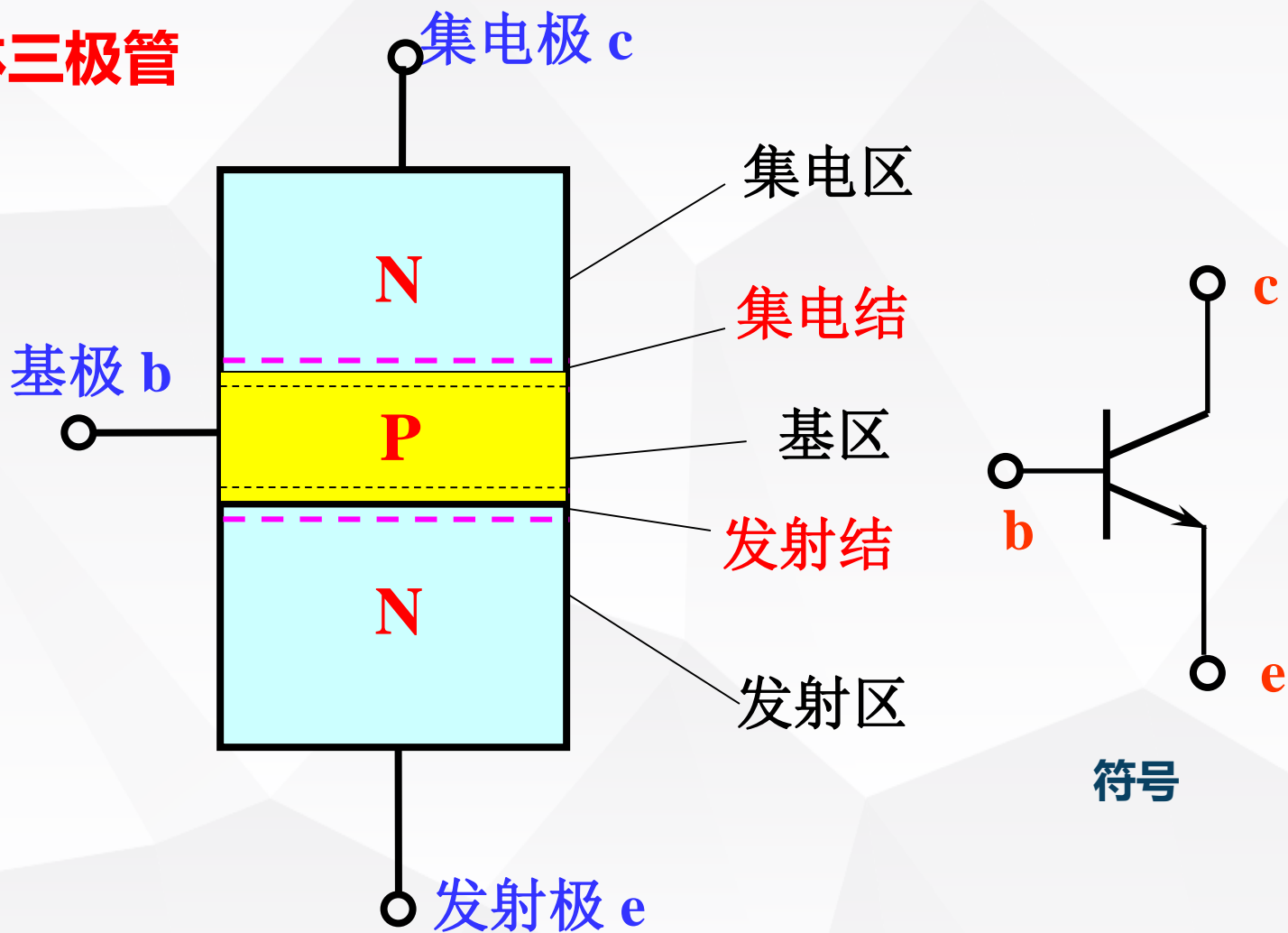
(a) 平面型(NPN)



(b) 合金型(PNP)

## 02 半导体二极管与三极管

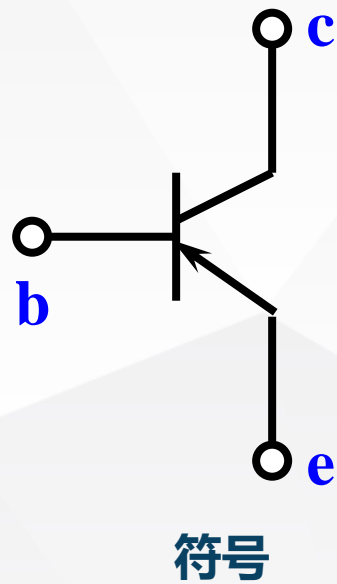
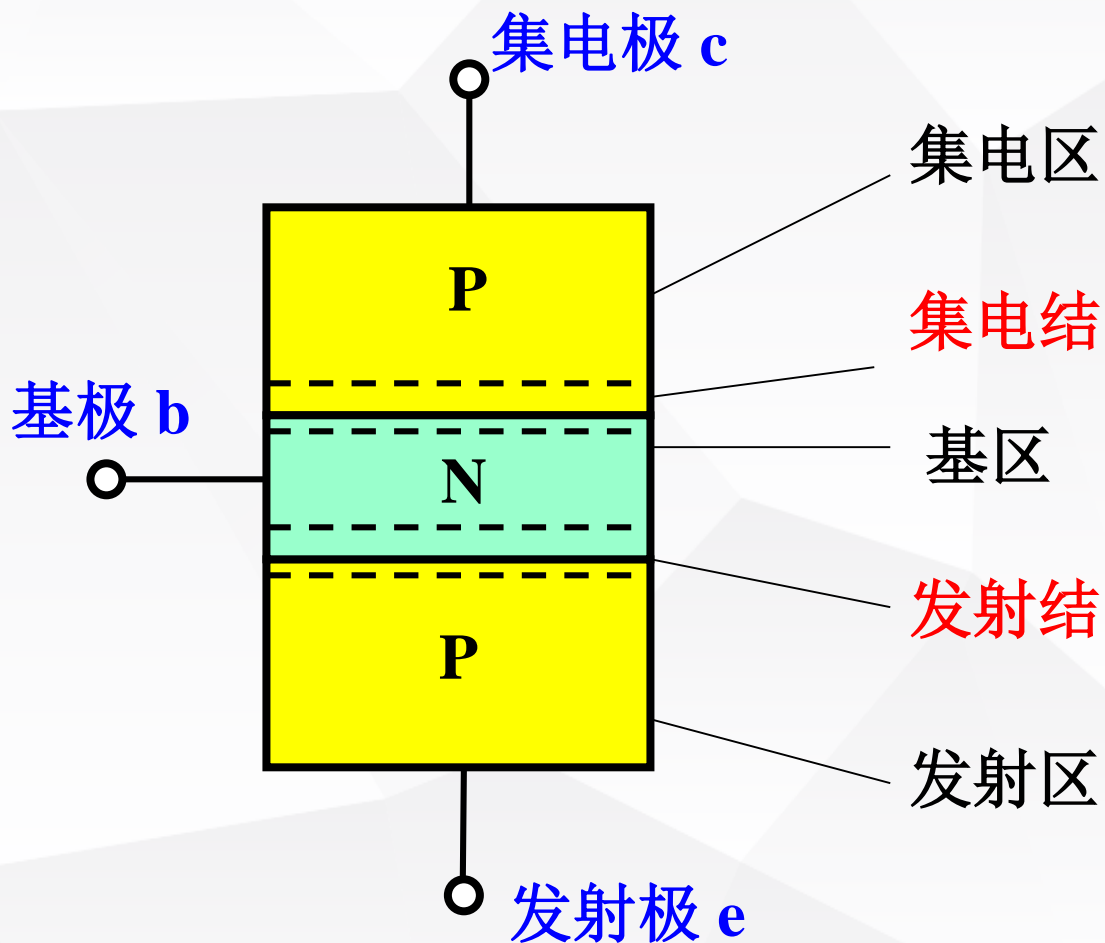
### 2.4 晶体三极管



NPN 型三极管结构示意图和符号

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

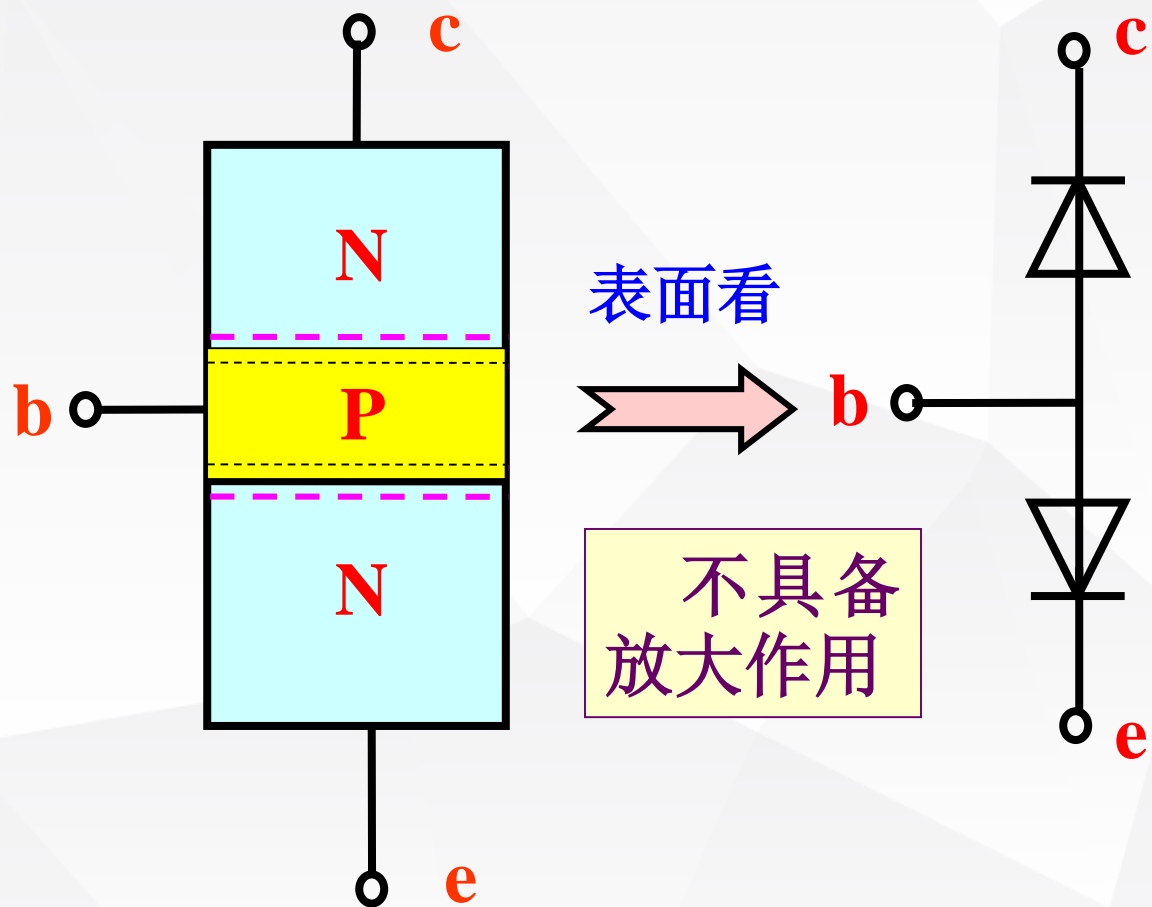


PNP 型三极管结构示意图和符号

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

#### 晶体管的电流放大作用



三极管若实现放大，必须从三极管内部结构和外部所加电源的极性来保证。

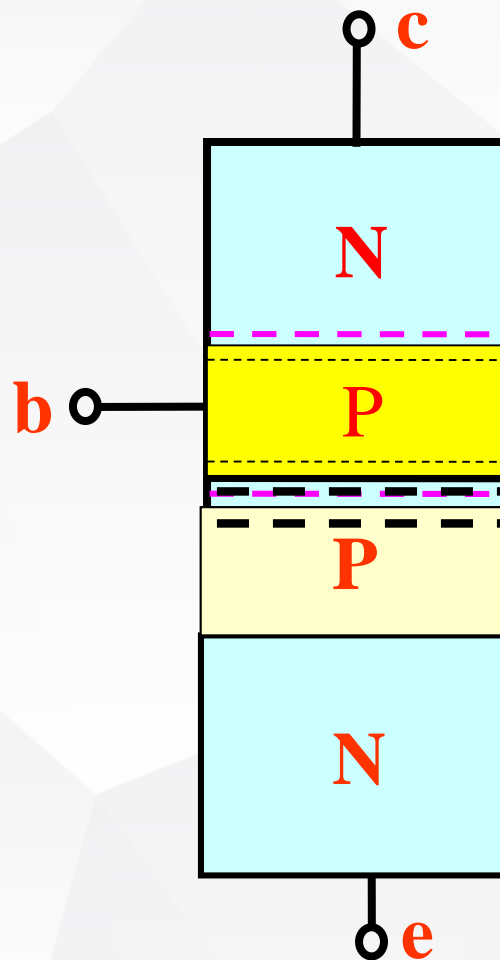
## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

三极管内部结构要求：

1. 发射区高掺杂。
2. 基区做得很薄。通常只有几微米到几十微米，而且掺杂较少。
3. 集电结面积大。

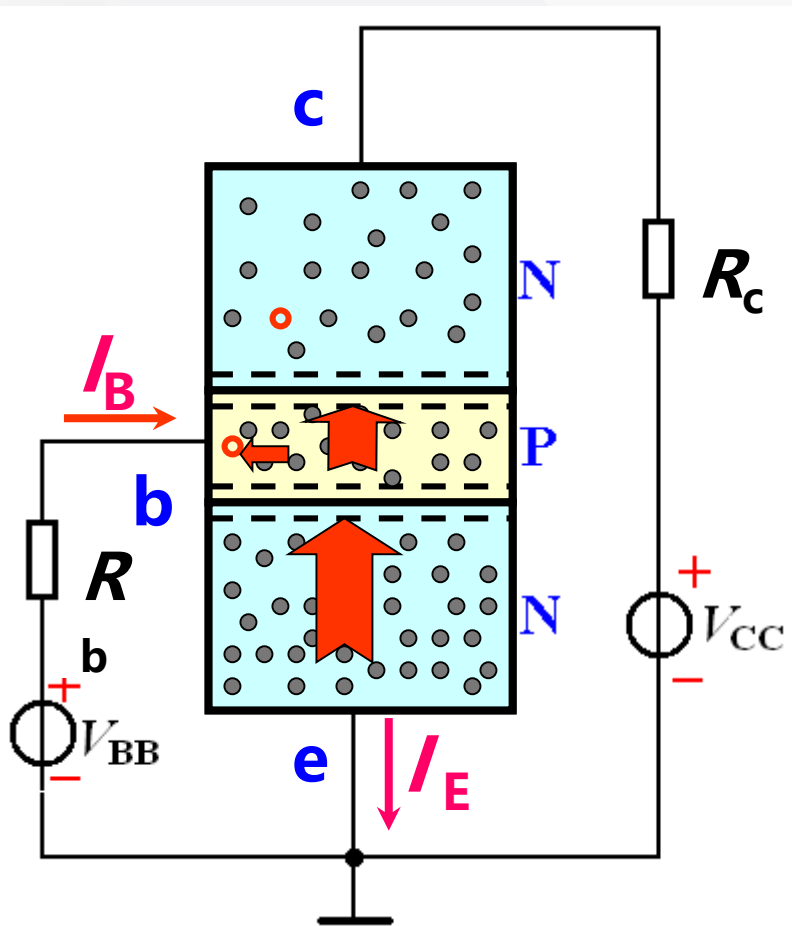
三极管放大的外部条件：外加电源的极性应使发射结处于正向偏置状态，而集电结处于反向偏置状态。



## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

#### 一、晶体管内部载流子的运动



#### 1. 发射结加正向电压，扩散运动形成发射极电流

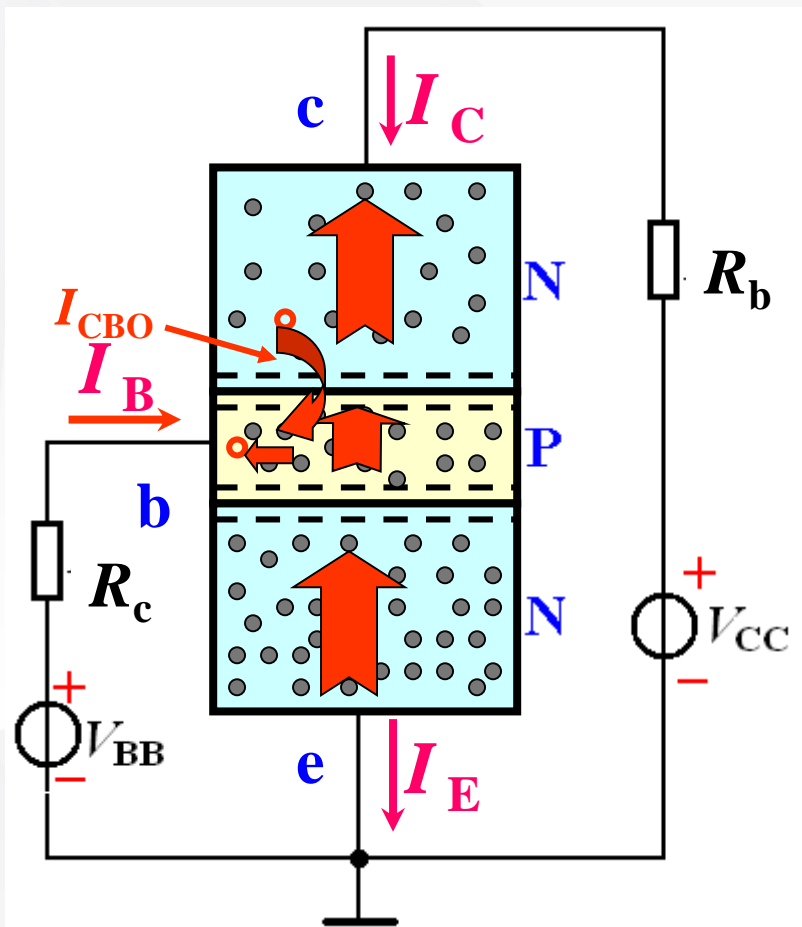
发射区的电子越过发射结扩散到基区，基区的空穴扩散到发射区——形成发射极电流  $I_E$  (基区多子数目较少，空穴电流可忽略)

#### 2. 扩散到基区的自由电子与空穴的复合运动形成基极电流

电子到达基区，少数与空穴复合形成基极电流  $I_{bn}$ ，复合掉的空穴由  $V_{BB}$  补充

多数电子在基区继续扩散，到达集电结的一侧

### 2.4 晶体三极管



3. 集电结加反向电压，漂移运动形成集电极电流  $I_C$

集电结反偏，有利于收集基区扩散过来的电子而形成集电极电流  $I_{cn}$ 。其能量来自外接电源  $V_{CC}$ 。

另外，集电区和基区的少子在外电场的作用下将进行漂移运动而形成反向饱和电流，用  $I_{CBO}$  表示。

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

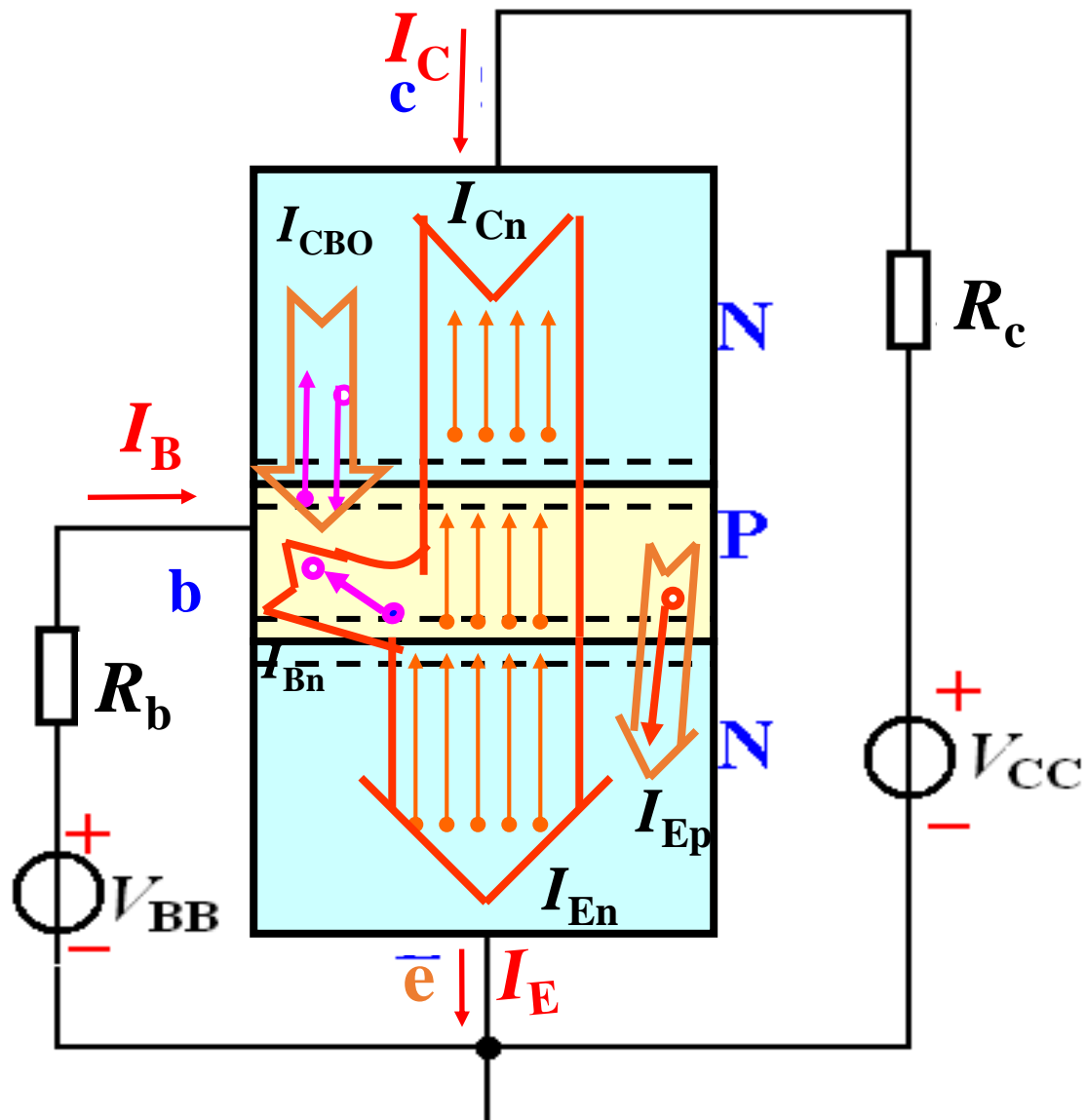
#### 晶体管的电流分配关系

$$\begin{aligned} I_E &= I_{Cn} + I_{Bn} + I_{Ep} \\ &= I_{En} + I_{Ep} \end{aligned}$$

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

$$I_B = I_{Ep} + I_{Bn} - I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B$$





## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

#### 晶体管的共射电流放大系数

##### 1、共射直流电流放大系数

$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

整理可得：

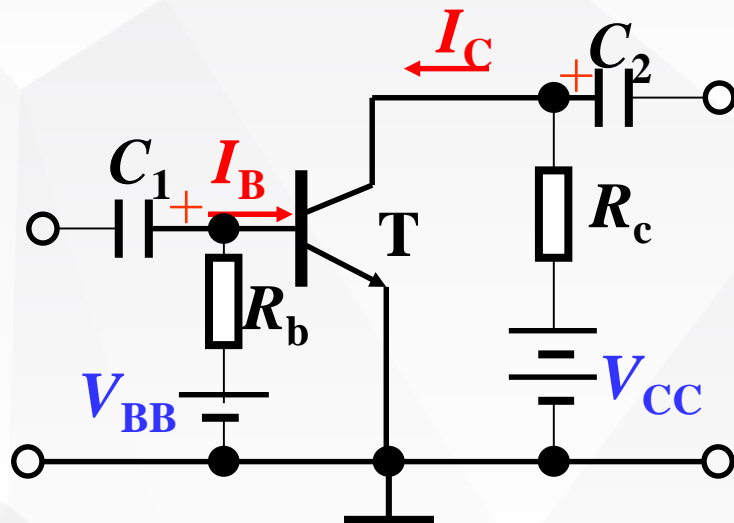
$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

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

$$I_E \approx (1 + \beta) I_B$$

##### 2、共射交流电流放大系数

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



共发射极接法

$I_{CBO}$  称反向饱和电流

$I_{CEO}$  称穿透电流

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

#### 3、共基直流电流放大系数

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{Cn}}{I_E}$$

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO} = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$$

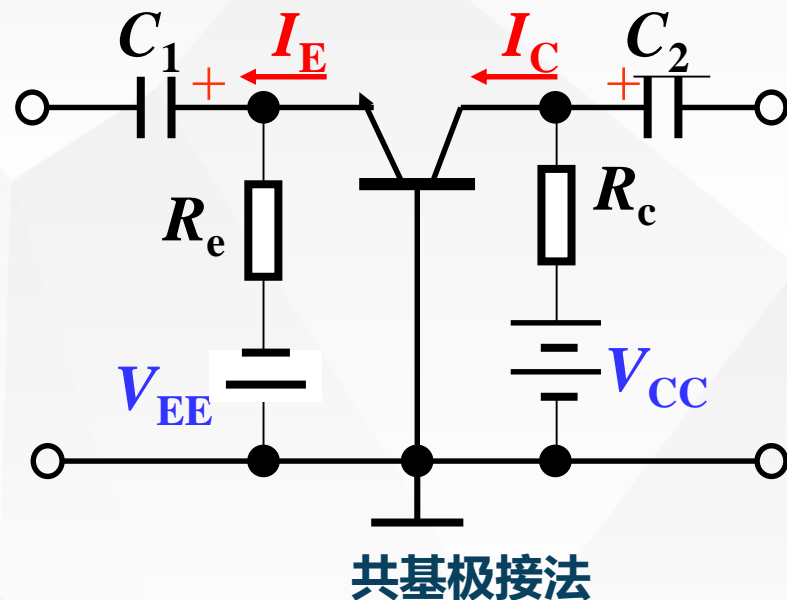
#### 4、共基交流电流放大系数

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E}$$

直流参数  $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$  与交流参数  $\alpha$ 、 $\beta$  的含义是不同的，但是，对于大多数三极管来说，其对应的数值差别不大，计算中，可不将它们严格区分。

#### 5. $\alpha$ 与 $\beta$ 的关系

$$\bar{\beta} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad \text{或} \quad \bar{\alpha} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}}$$



## 02 半导体二极管与三极管

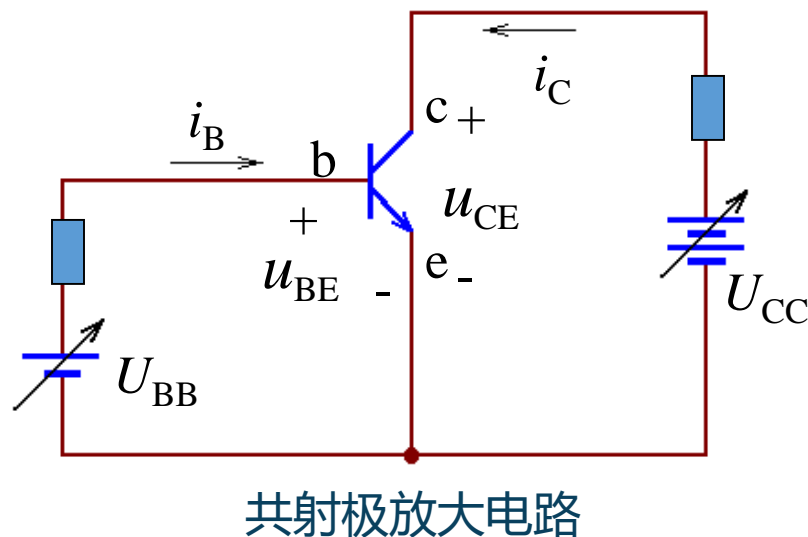
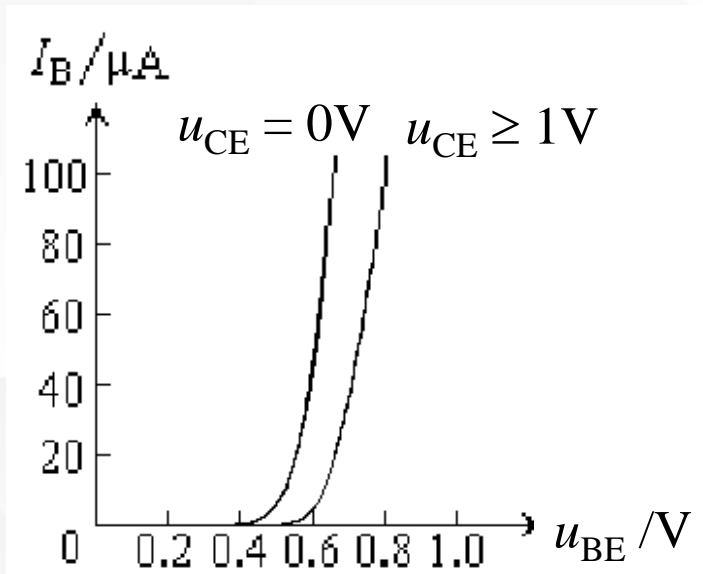
### 2.4 晶体三极管

#### 晶体管的共射特性曲线

一. 输入特性曲线  $i_B = f(u_{BE}) \mid u_{CE} = \text{const}$

(1) 当  $u_{CE} = 0V$  时, 相当于发射结的正向伏安特性曲线。

(2) 当  $u_{CE} \geq 1V$  时,  $u_{CB} = u_{CE} - u_{BE} > 0$ , 集电结已进入反偏状态, 开始收集电子, 基区复合减少, 在同样的  $u_{BE}$  下  $i_B$  减小, 特性曲线右移。



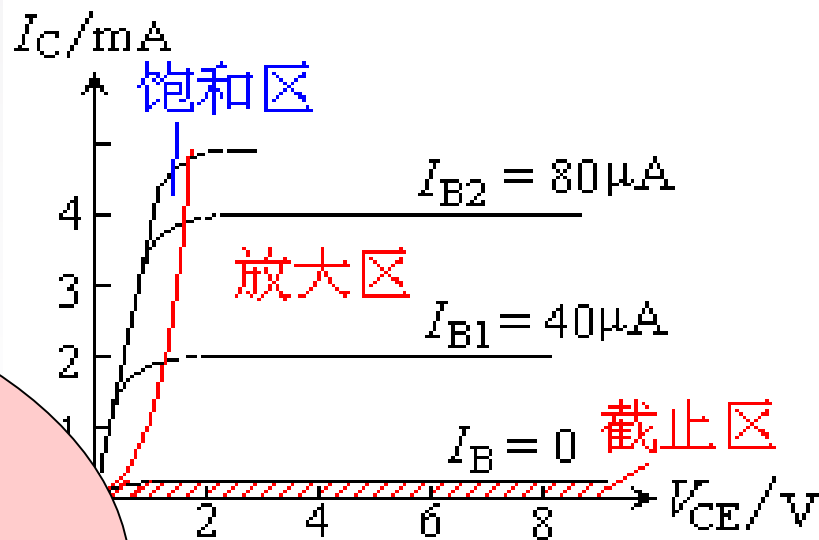
### 2.4 晶体三极管

#### 二、输出特性曲线

$$i_C = f(u_{CE}) \mid I_B = \text{const}$$

输出特性曲线的三个区域:

**放大区:**  $i_C$  平行于  $u_{CE}$  轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, 发射结正偏, 集电结反偏。



### 2.4 晶体三极管

#### 晶体管的主要参数

三极管的参数分为三大类:

直流参数、交流参数、极限参数

#### 一、直流参数

##### 1. 共发射极直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = (I_C - I_{CEO}) / I_B \approx I_C / I_B \mid v_{CE} = \text{const}$$

##### 2. 共基直流电流放大系数

$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E}$$

##### 3. 集电极基极间反向饱和电流 $I_{CBO}$

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

集电极发射极间的反向饱和电流  $I_{CEO}$

### 2.4 晶体三极管

#### 二、交流参数

##### 1. 共发射极交流电流放大系数 $\beta$

$$\beta = \Delta i_C / \Delta i_B \mid u_{CE} = \text{const}$$

##### 2. 共基极交流电流放大系数 $\alpha$

$$\alpha = \Delta i_C / \Delta i_E \mid u_{CB} = \text{const}$$

##### 3. 特征频率 $f_T$

**$\beta$ 值下降到1的信号频率**

### 2.4 晶体三极管

#### 三、极限参数

1. 最大集电极耗散功率  $P_{CM}$

$$P_{CM} = i_C u_{CE}$$

2. 最大集电极电流  $I_{CM}$

3. 反向击穿电压

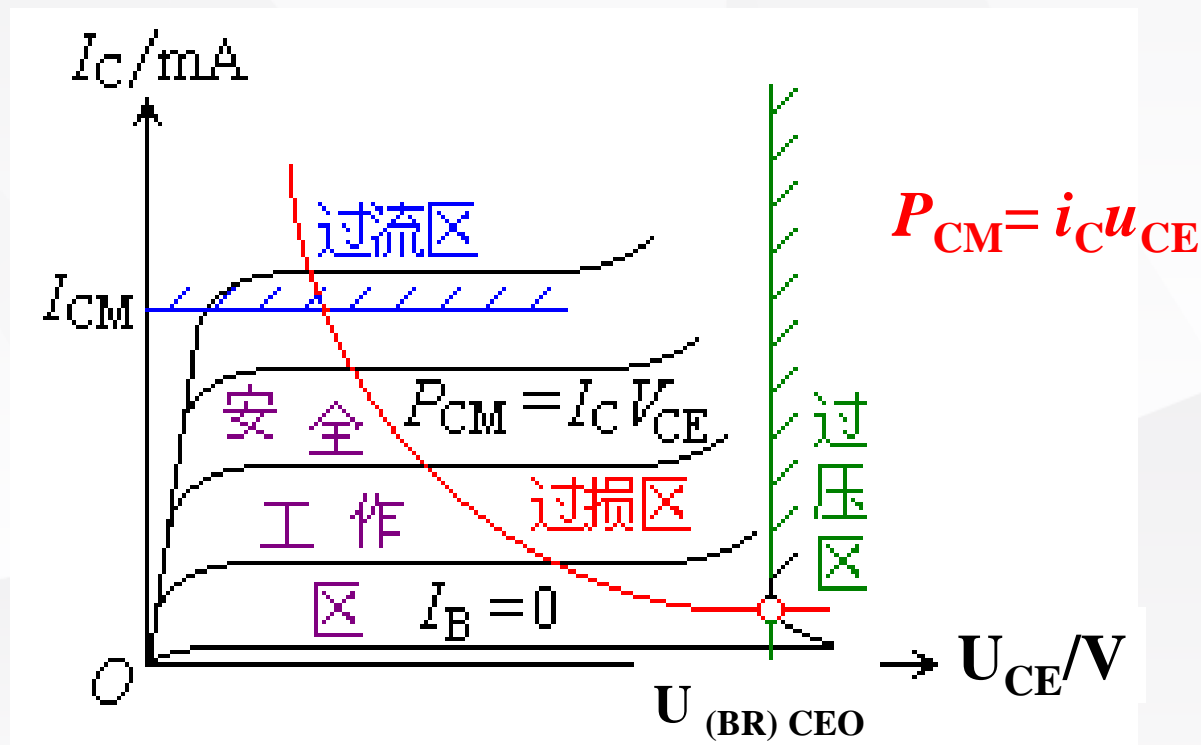
- $U_{CBO}$ ——发射极开路时的集电结反向击穿电压。
- $U_{CEO}$ ——基极开路时集电极和发射极间的击穿电压。
- $U_{EBO}$ ——集电极开路时发射结的反向击穿电压。

几个击穿电压有如下关系  $U_{CBO} > U_{CEO} > U_{EBO}$

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

由  $P_{CM}$ 、 $I_{CM}$  和  $U_{CEO}$  在输出特性曲线上可以确定过损耗区、过电流区和击穿区。



输出特性曲线上的过损耗区和击穿区



## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

#### 温度对晶体管特性及参数的影响

##### 一、温度对 $I_{CBO}$ 的影响

温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ， $I_{CBO}$ 增加约一倍。

反之，当温度降低时 $I_{CBO}$ 减少。

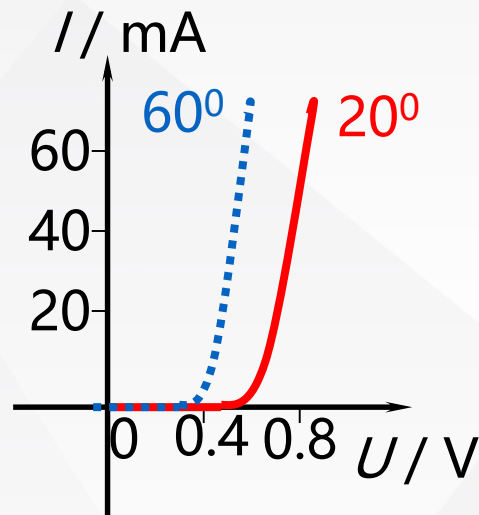
硅管的 $I_{CBO}$ 比锗管的小得多。

##### 二、温度对输入特性的影响

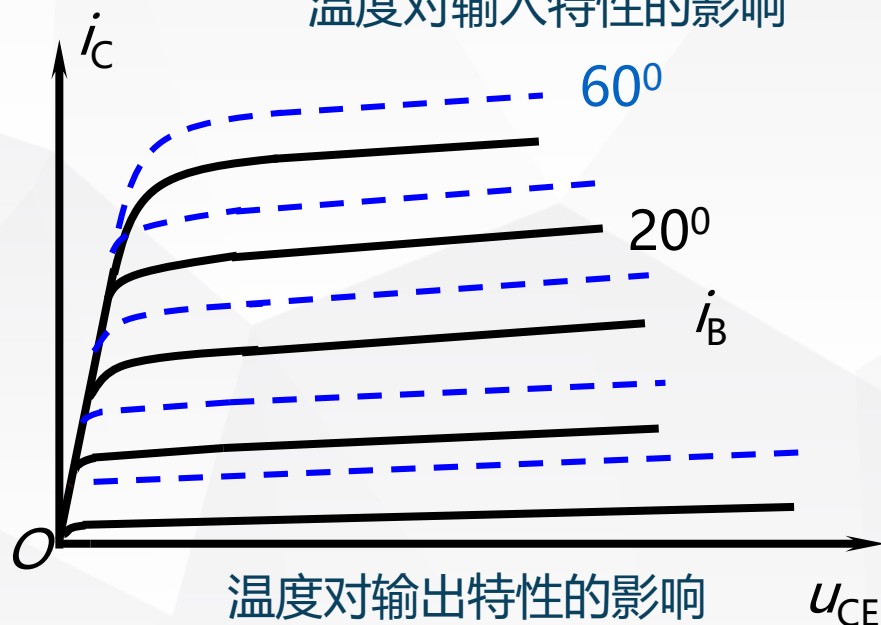
温度升高时正向特性左移，  
反之右移

##### 三、温度对输出特性的影响

温度升高将导致  $I_C$  增大



温度对输入特性的影响



温度对输出特性的影响

### 2.4 晶体三极管

#### 三极管工作状态的判断

[例1]: 测量某NPN型BJT各电极对地的电压值如下, 试判别管子工作在什么区域?

(1)  $V_C = 6V$        $V_B = 0.7V$        $V_E = 0V$

(2)  $V_C = 6V$        $V_B = 4V$        $V_E = 3.6V$

(3)  $V_C = 3.6V$        $V_B = 4V$        $V_E = 3.4V$

原则:

	截止	放大	饱和
发射结	反偏	正偏	正偏
集电结	反偏	反偏	正偏

解: 对NPN管而言, 放大时  $V_C > V_B > V_E$

对PNP管而言, 放大时  $V_C < V_B < V_E$

(1) 放大区

(2) 截止区

(3) 饱和区

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

[例2] 某放大电路中BJT三个电极的电流如图所示。

$I_A = -2\text{mA}$ ,  $I_B = -0.04\text{mA}$ ,  $I_C = +2.04\text{mA}$ , 试判断管脚、管型。

解：电流判断法。

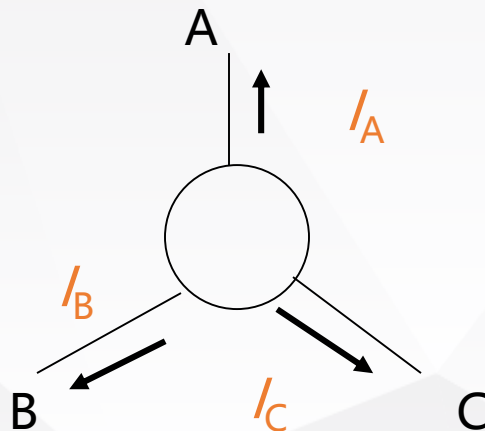
电流的正方向和KCL。  $I_E = I_B + I_C$

C为发射极

B为基极

A为集电极。

管型为NPN管。



管脚、管型的判断法也可采用万用表电阻法。参考实验。

## 02 半导体二极管与三极管

### 2.4 晶体三极管

例[3]: 测得工作在放大电路中几个晶体管三个电极的电位 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ 分别为:

- (1)  $U_1=3.5V$ 、 $U_2=2.8V$ 、 $U_3=12V$
- (2)  $U_1=3V$ 、 $U_2=2.8V$ 、 $U_3=12V$
- (3)  $U_1=6V$ 、 $U_2=11.3V$ 、 $U_3=12V$
- (4)  $U_1=6V$ 、 $U_2=11.8V$ 、 $U_3=12V$

判断它们是NPN型还是PNP型? 是硅管还是锗管? 并确定e、b、c。

解: 原则: 先求 $U_{BE}$ , 若等于0.6-0.7V, 为硅管; 若等于0.2-0.3V, 为锗管。  
发射结正偏, 集电结反偏。

NPN管  $U_{BE} > 0$ ,  $U_{BC} < 0$ , 即  $U_C > U_B > U_E$ 。

PNP管  $U_{BE} < 0$ ,  $U_{BC} < 0$ , 即  $U_C < U_B < U_E$ 。

(1)  $U_1$  b、 $U_2$  e、 $U_3$  c NPN 硅

(2)  $U_1$  b、 $U_2$  e、 $U_3$  c NPN 锗

(3)  $U_1$  c、 $U_2$  b、 $U_3$  e PNP 硅

(4)  $U_1$  c、 $U_2$  b、 $U_3$  e PNP 锗

## ➤ 02 半导体二极管与三极管

### 2.5 场效应三极管

**场效应管：**一种载流子参与导电，利用输入回路的电场效应来控制输出回路电流的三极管，又称**单极型三极管**。

**特点**

单极型器件(一种载流子导电);

输入电阻高;

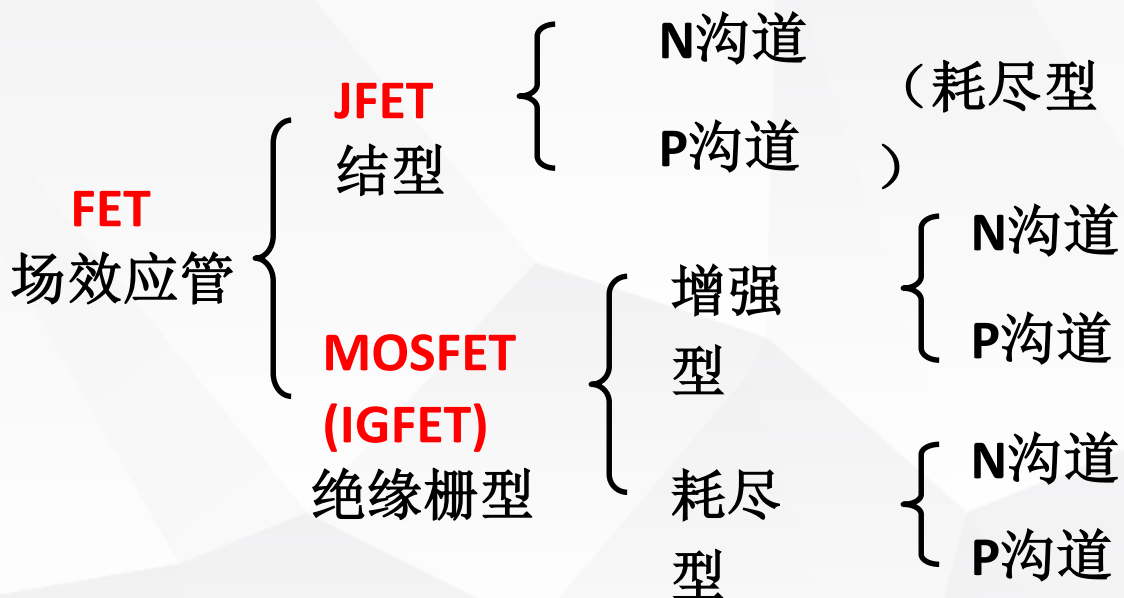
工艺简单、易集成、功耗小、体积小、成本低。

**场效应管分类**

结型场效应管

绝缘栅场效应管

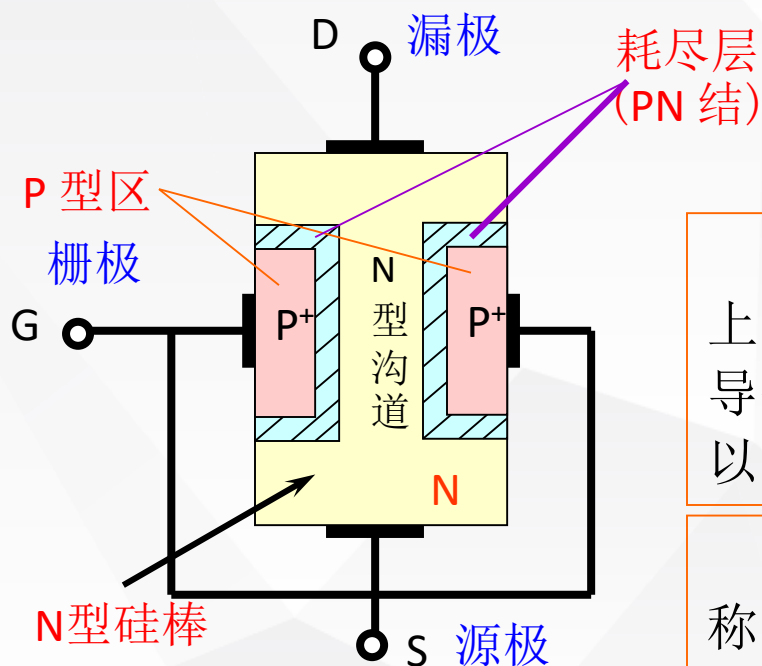
### 场效应管分类：



## 02 半导体二极管与三极管

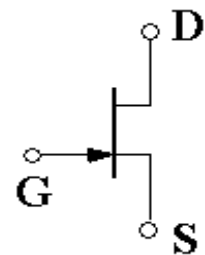
### 3.7.1 结型场效应管 Junction Field Effect Transistor

结构



N 沟道结型场效应管结构图

符号

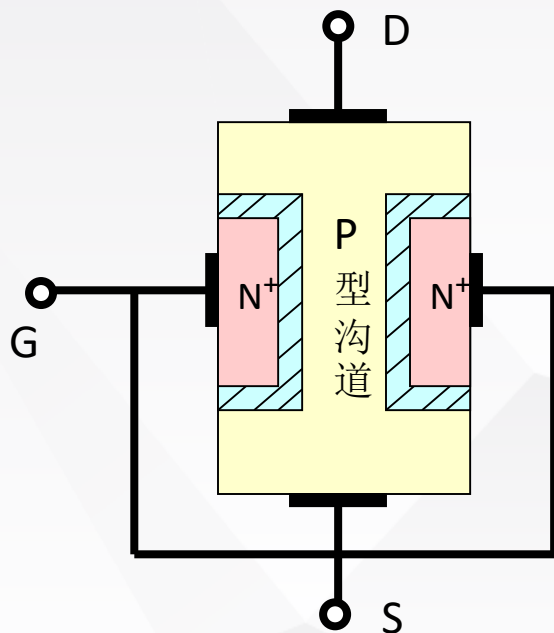


在漏极和源极之间加上一个正向电压，N 型半导体中多数载流子电子可以导电。

导电沟道是 N 型的，称 N 沟道结型场效应管。

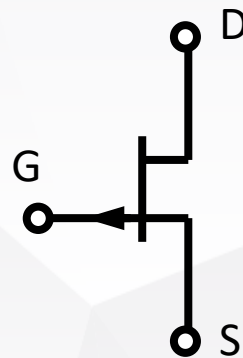
## 02 半导体二极管与三极管

### P 沟道场效应管



P 沟道结型场效应管结构图

P 沟道场效应管是在 P 型硅棒的两侧做成高掺杂的 N 型区(N<sup>+</sup>)，导电沟道为 P 型，多数载流子为空穴。



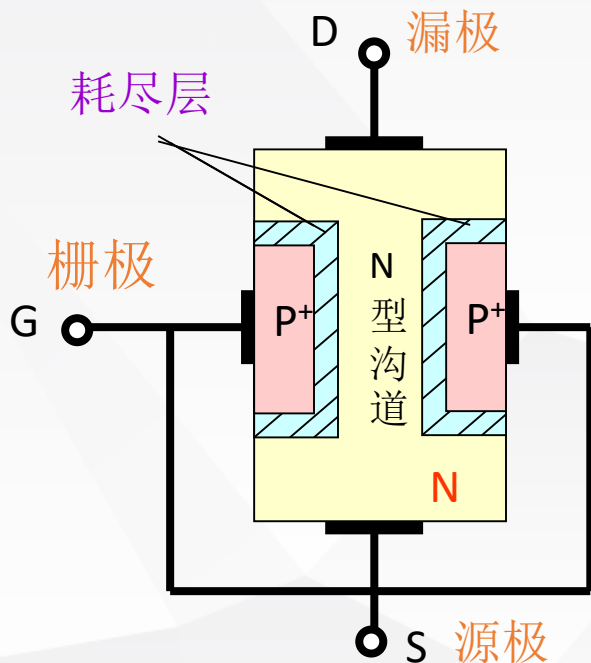
符号



## 02 半导体二极管与三极管

### 一、结型场效应管工作原理

N 沟道结型场效应管用改变  $U_{GS}$  大小来控制漏极电流  $I_D$  的。(VCCS)



\*在栅极和源极之间加反向电压，耗尽层会变宽，导电沟道宽度减小，使沟道本身的电阻值增大，漏极电流  $I_D$  减小，反之，漏极  $I_D$  电流将增加。

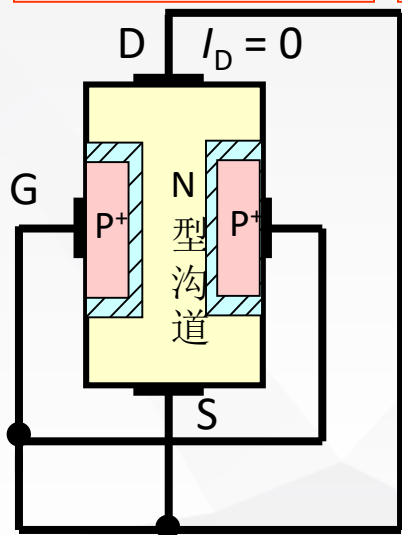
\*耗尽层的宽度改变主要在沟道区。

## 02 半导体二极管与三极管

### 1. 当 $U_{DS} = 0$ 时, $u_{GS}$ 对导电沟道的控制作用

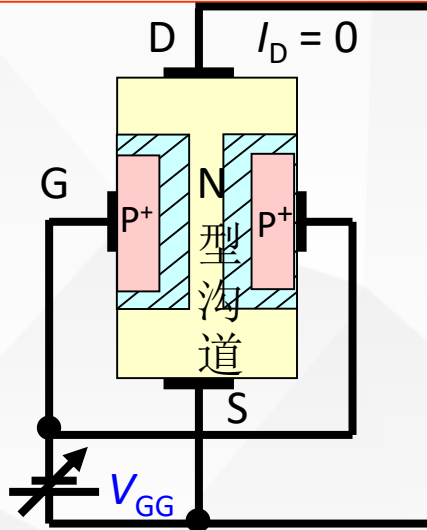
$U_{GS(off)}$  为夹断电压, 为负值。  $U_{GS(off)}$  也可用  $U_p$  表示

$U_{GS} = 0$  时, 耗尽层比较窄, 导电沟比较宽



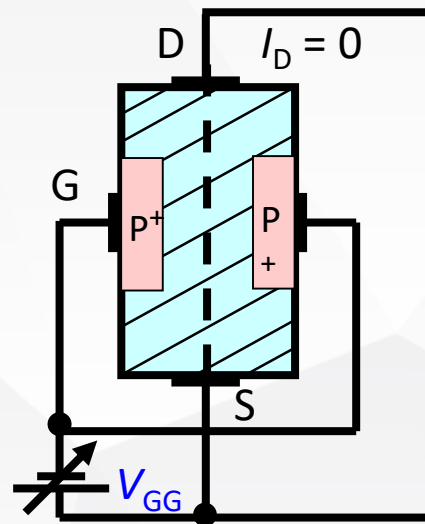
(a)  $U_{GS} = 0$

$U_{GS}$  由零逐渐减小, 耗尽层逐渐加宽, 导电沟相应变窄。



(b)  $U_{GS(off)} < U_{GS} < 0$

当  $U_{GS} = U_{GS(off)}$ , 耗尽层合拢, 导电沟被夹断。

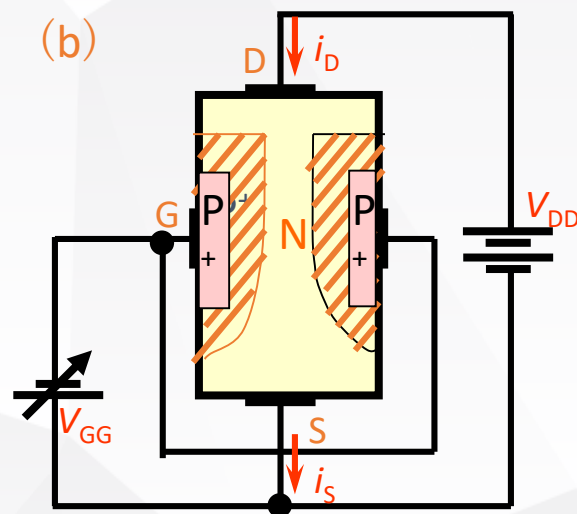
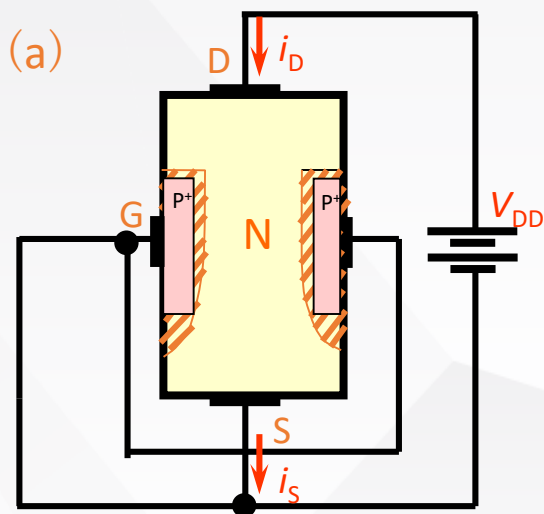


(c)  $U_{GS} < U_{GS(off)}$

## 02 半导体二极管与三极管

2. 当  $u_{GS}$  为  $U_{GS(Off)}$  ~ 0 中一固定值时,  $u_{DS}$  对漏极电流  $i_D$  的影响。

$$u_{GD} = u_{GS} - u_{DS}$$

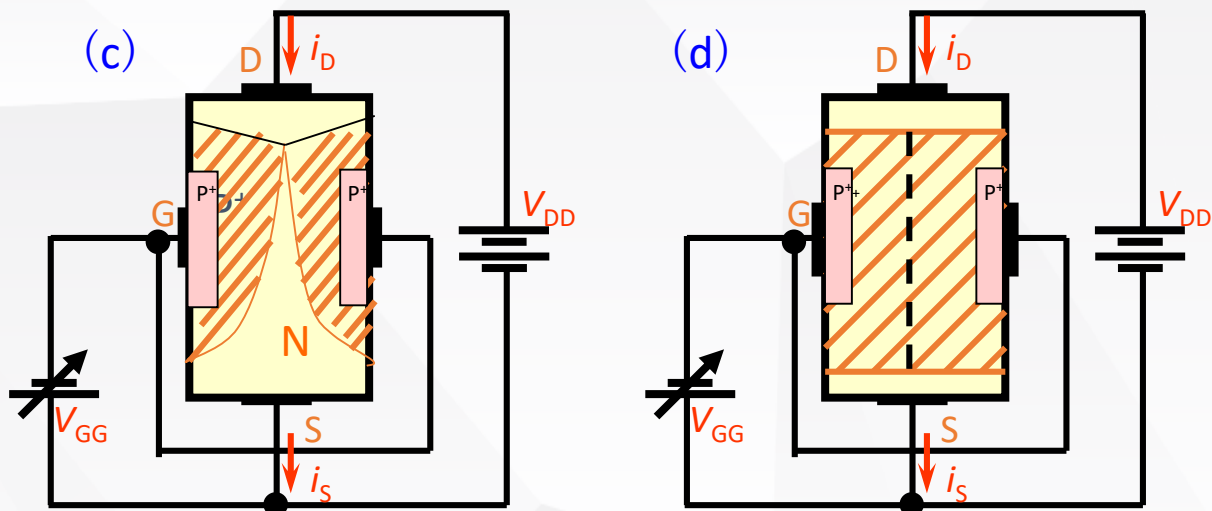


$u_{GS} = 0$ ,  $u_{GD} > U_{GS(Off)}$ ,  $i_D$  较大。

$u_{GS} < 0$ ,  $u_{GD} > U_{GS(Off)}$ ,  $i_D$  更小。

注意：当  $u_{DS} > 0$  时，耗尽层呈现楔形。

## 02 半导体二极管与三极管



$u_{GS} < 0, u_{GD} = U_{GS(off)}$ , 沟道变窄预夹断

$u_{GS} < 0, u_{GD} < u_{GS(off)}$ , 夹断,  $i_D$  几乎不变

- (1) 改变  $u_{GS}$ , 改变了 PN 结中电场, 控制了  $i_D$ , 故称场效应管;
- (2) 结型场效应管栅源之间加反向偏置电压, 使 PN 反偏, 栅极基本不取电流, 因此, 场效应管输入电阻很高。

## 02 半导体二极管与三极管

3. 当  $u_{GD} < u_{GS(off)}$  时,  $u_{GS}$  对漏极电流  $i_D$  的控制作用

在  $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < u_{GS(off)}$ , 当  $u_{DS}$  为一常量时, 对应于确定的  $u_{GS}$ , 就有确定的  $i_D$ 。

场效应管为电压控制元件 (VCCS)。

场效应管用低频跨导  $g_m$  的大小描述栅源电压对漏极电流的控制作用。

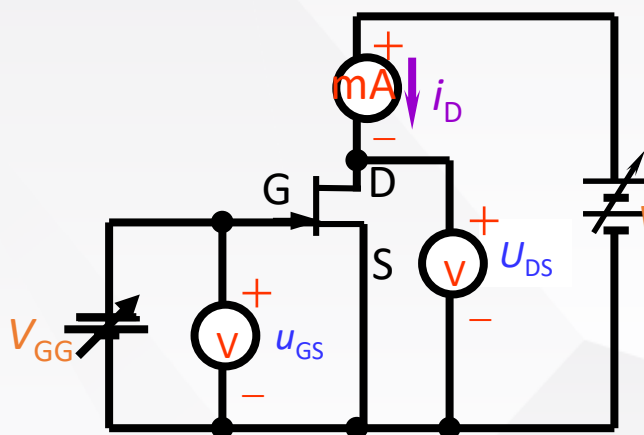
$$g_m = \Delta i_D / \Delta u_{GS} \quad (\text{单位 mS})$$

### 小结

- (1) 在  $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} > u_{GS(off)}$  情况下, 即当  $u_{DS} < u_{GS} - u_{GS(off)}$  对应于不同的  $u_{GS}$ , d-s 间等效成不同阻值的电阻。
- (2) 当  $u_{DS}$  使  $u_{GD} = u_{GS(off)}$  时, d-s 之间预夹断
- (3) 当  $u_{DS}$  使  $u_{GD} < u_{GS(off)}$  时,  $i_D$  几乎仅仅决定于  $u_{GS}$ , 而与  $u_{DS}$  无关。此时, 可以把  $i_D$  近似看成  $u_{GS}$  控制的电流源。

### 二、结型场效应管的特性曲线

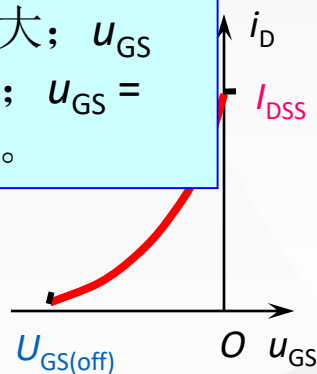
#### 1. 转移特性 (N 沟道结型场效应管为例)



特性曲线测试电路

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=\text{常数}}$$

$u_{GS} = 0$ ,  $i_D$  最大;  $u_{GS}$  愈负,  $i_D$  愈小;  $u_{GS} = U_{GS(\text{off})}$ ,  $i_D \approx 0$ 。



转移特性

两个重要参数

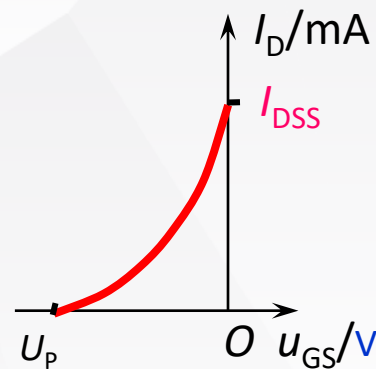
{ 夹断电压  $U_{GS(\text{off})}$  ( $I_D = 0$  时的  $U_{GS}$ )  
饱和漏极电流  $I_{DSS}$  ( $U_{GS} = 0$  时的  $I_D$ )

## 02 半导体二极管与三极管

### 转移特性

结型场效应管转移特性曲线的近似公式：

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$
$$(U_{GS(off)} \leq u_{GS} \leq 0)$$



转移特性

### 2. 输出特性曲线

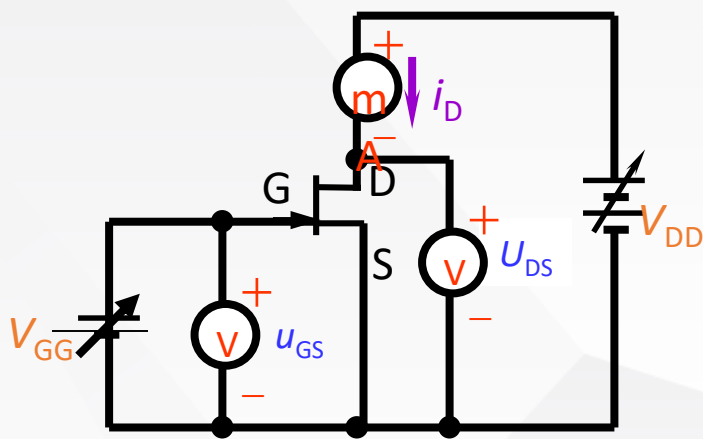
当栅源 之间的电压  $U_{GS}$  不变时，漏极电流  $i_D$  与漏源之间电压  $u_{DS}$  的关系，即

$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=\text{常数}}$$

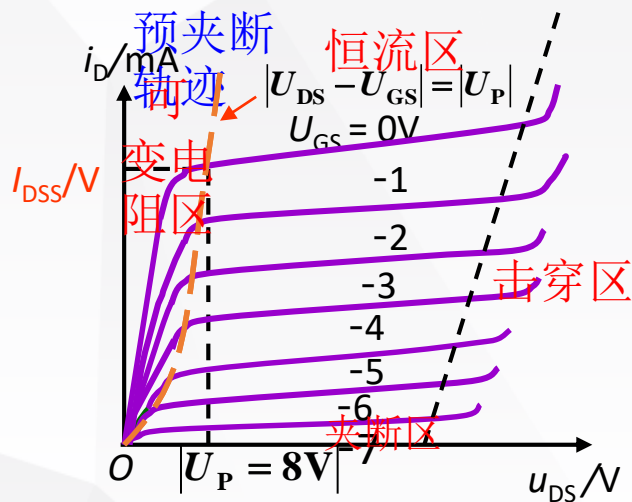


## 02 半导体二极管与三极管

输出特性（漏极特性）曲线



特性曲线测试电路



漏极特性

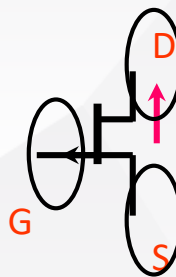
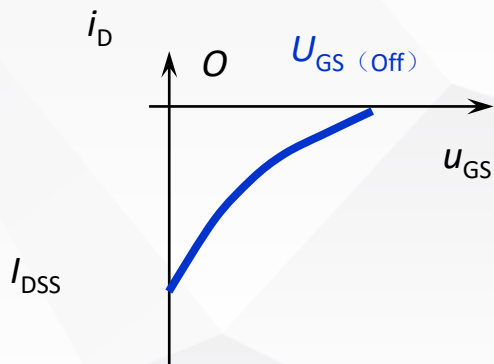
漏极特性也有三个区：可变电阻区、恒流区和夹断区。

## 02 半导体二极管与三极管

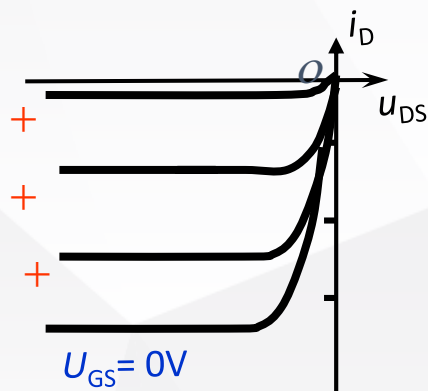
### \* 结型P沟道的特性曲线

栅源加正偏电压，(PN结反偏)  
漏源加反偏电压。

转移特性曲线



输出特性曲线



### 3.7.2 绝缘栅型场效应管 MOSFET

Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

由金属、氧化物和半导体制成。称为金属-氧化物-半导体场效应管，或简称 MOS 场效应管。

特点：输入电阻可达  $10^{10} \Omega$  以上。

类型	{	N 沟道	{	增强型
			{	耗尽型
	{	P 沟道	{	增强型
			{	耗尽型

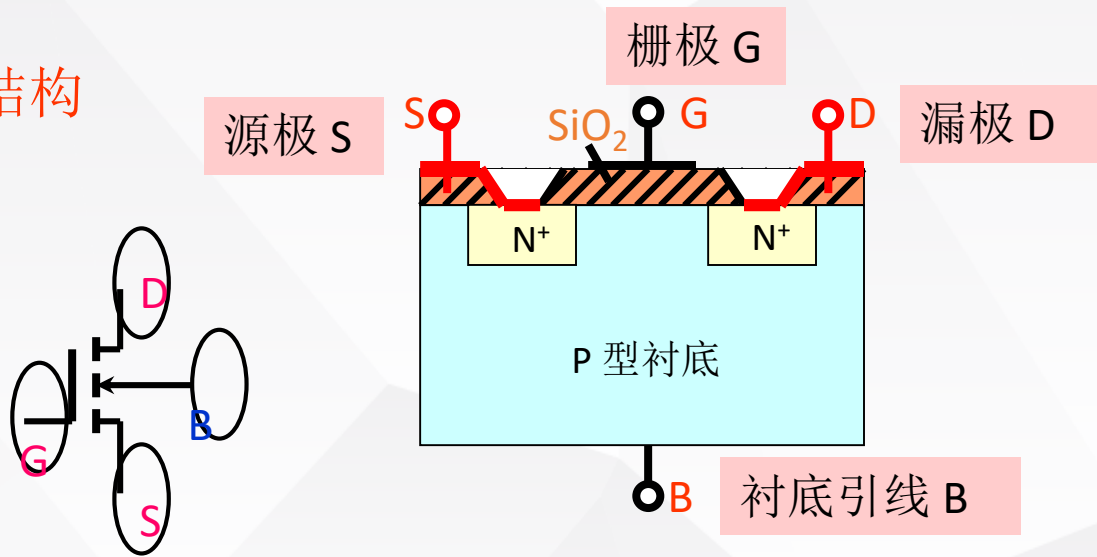
$U_{GS} = 0$  时漏源间存在导电沟道称耗尽型场效应管；

$U_{GS} = 0$  时漏源间不存在导电沟道称增强型场效应管。

## 02 半导体二极管与三极管

### 一、N 沟道增强型 MOS 场效应管

结构



N 沟道增强型 MOS 场效应管的结构示意图

## 02 半导体二极管与三极管

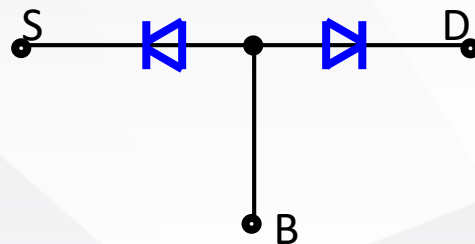
### 1. 工作原理

绝缘栅场效应管利用  $U_{GS}$  来控制“感应电荷”的多少，改变由这些“感应电荷”形成的导电沟道的状况，以控制漏极电流  $I_D$ 。

### 2. 工作原理分析

(1)  $U_{GS} = 0$

漏源之间相当于两个背靠背的 PN 结，无论漏源之间加何种极性电压，总是不导电。



## 02 半导体二极管与三极管

(2)  $U_{DS} = 0, 0 < U_{GS} < U_{GS(th)}$

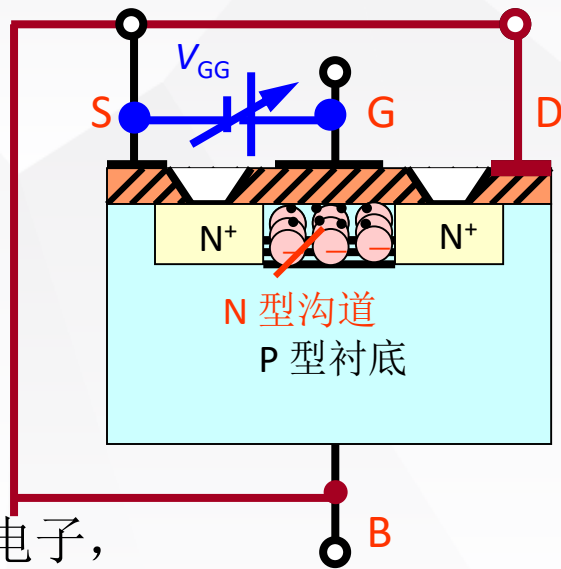
栅极金属层将聚集正电荷，它们排斥P型衬底靠近  $\text{SiO}_2$  一侧的空穴，形成由负离子组成的耗尽层。增大  $U_{GS}$  耗尽层变宽。

(3)  $U_{DS} = 0, U_{GS} \geq U_{GS(th)}$

由于吸引了足够多P型衬底的电子，会在耗尽层和  $\text{SiO}_2$  之间形成可移动的表面电荷层——反型层、N型导电沟道。

$U_{GS}$  升高，N沟道变宽。因为  $U_{DS} = 0$ ，所以  $I_D = 0$ 。

$U_{GS(th)}$  或  $U_T$  为开始形成反型层所需的  $U_{GS}$ ，称开启电压。



## 02 半导体二极管与三极管

(4)  $U_{DS}$  对导电沟道的影响 ( $U_{GS} > U_T$ )

a.  $U_{DS} < U_{GS} - U_T$ ，即  $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} > U_T$

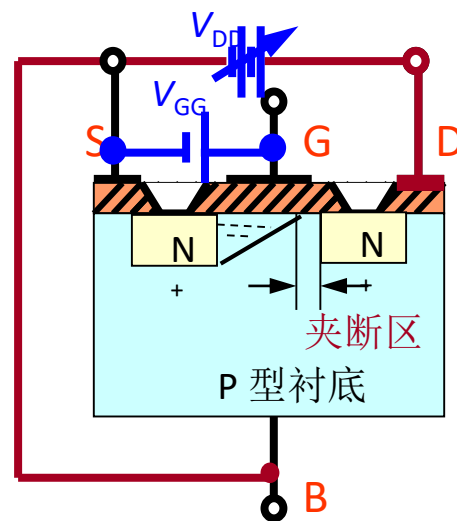
导电沟道呈现一个楔形。  
漏极形成电流  $I_D$ 。

b.  $U_{DS} = U_{GS} - U_T$ ， $U_{GD} = U_T$

靠近漏极沟道达到临界开启程度，出现预夹断。

c.  $U_{DS} > U_{GS} - U_T$ ， $U_{GD} < U_T$

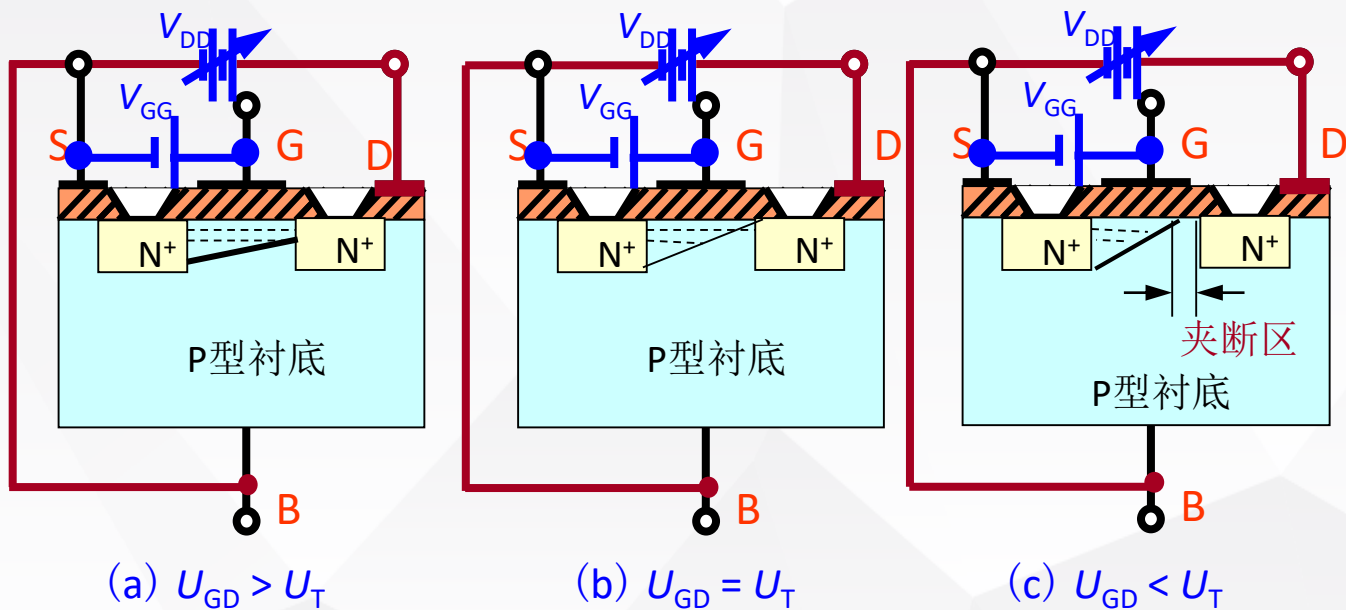
由于夹断区的沟道电阻很大， $U_{DS}$  逐渐增大时，导电沟道两端电压基本不变， $i_D$  因而基本不变。



## 02 半导体二极管与三极管

在  $U_{DS} > U_{GS} - U_T$  时，对应于不同的  $u_{GS}$  就有一个确定的  $i_D$ 。

此时，可以把  $i_D$  近似看成是  $u_{GS}$  控制的电流源。



$U_{DS}$  对导电沟道的影响



## 02 半导体二极管与三极管

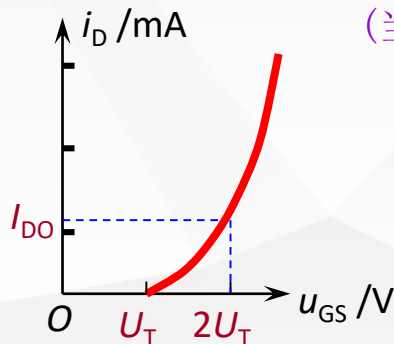
### 3. 特性曲线与电流方程

#### (a) 转移特性

$U_{GS} < U_T$ ,  $i_D = 0$ ;

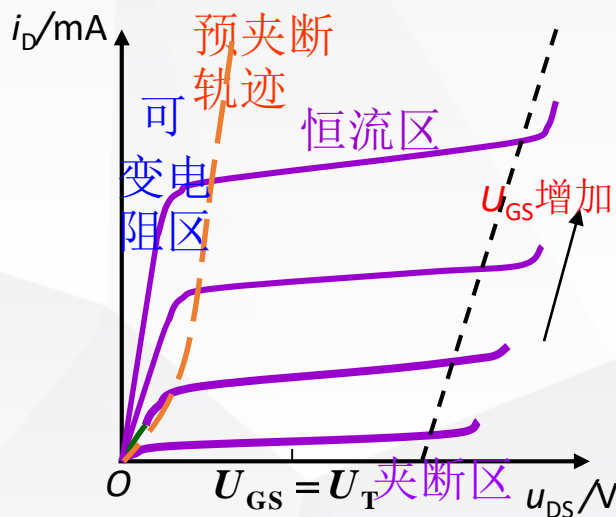
$U_{GS} \geq U_T$ , 形成导电沟道, 随着  $U_{GS}$  的增加,  $i_D$  逐渐增大。

$$i_D = I_{DO} \left( \frac{u_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2 \quad (\text{当 } U_{GS} > U_T \text{ 时})$$



#### (b) 输出特性

三个区：可变电阻区、恒流区(或饱和区)、夹断区。



## 02 半导体二极管与三极管

### 二、N 沟道耗尽型 MOS 场效应管

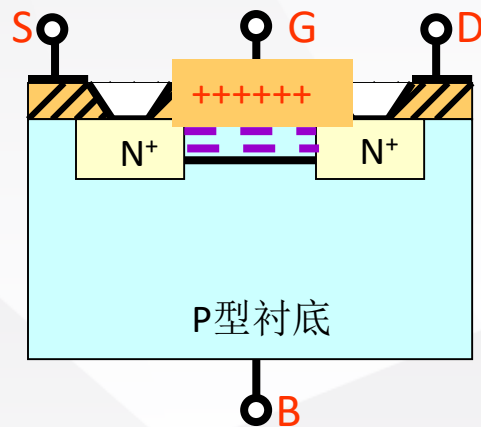
制造过程中预先在二氧化硅的绝缘层中掺入正离子，这些正离子电场在 P 型衬底中“感应”负电荷，形成“反型层”。即使  $U_{GS} = 0$  也会形成 N 型导电沟道。

$U_{GS} = 0$ ， $U_{DS} > 0$ ，产生较大的漏极电流；

$U_{GS} < 0$ ，绝缘层中正离子感应的负电荷减少，导电沟道变窄， $i_D$  减小；

$U_{GS} = U_P$ ，感应电荷被“耗尽”， $i_D \approx 0$ 。

$U_P$  或  $U_{GS(off)}$  称为夹断电压



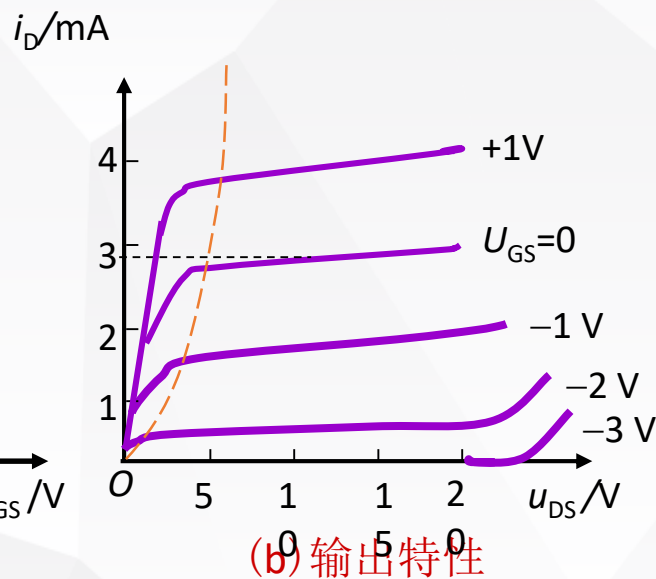
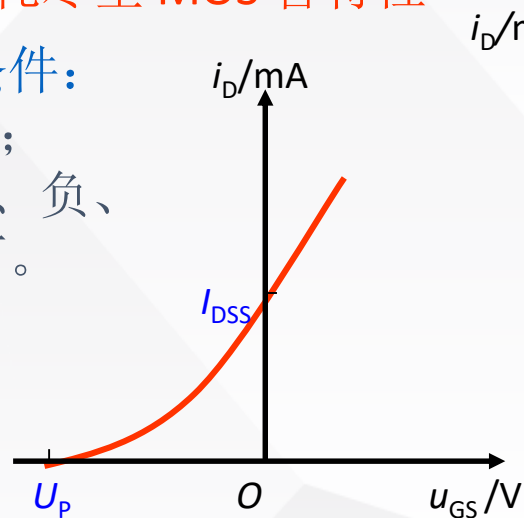
## 02 半导体二极管与三极管

### N 沟道耗尽型 MOS 管特性

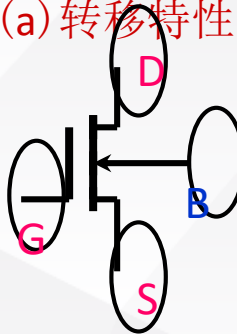
工作条件:

$$U_{DS} > 0;$$

$U_{GS}$  正、负、  
零均可。



耗尽型 MOS  
管的符号



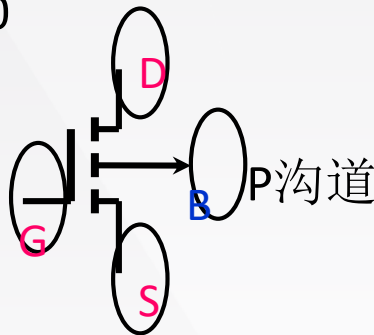
N 沟道耗尽型 MOSFET

## 02 半导体二极管与三极管

### 三、P沟道MOS管

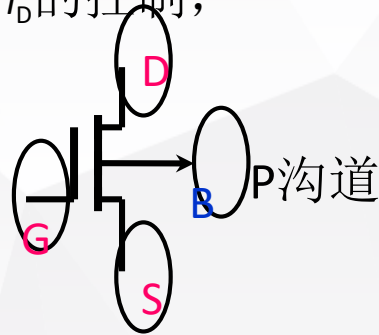
1. **P沟道增强型MOS管**的开启电压  $U_{GS(th)} < 0$

当  $U_{GS} < U_{GS(th)}$  ,  
漏-源之间应加负电源电压  
管子才导通,空穴导电。



2. **P沟道耗尽型MOS管**的夹断电压  $U_{GS(off)} > 0$

$U_{GS}$  可在正、负值的一定范围内实现对  $i_D$  的控制,  
漏-源之间应加负电源电压。


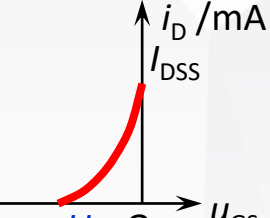
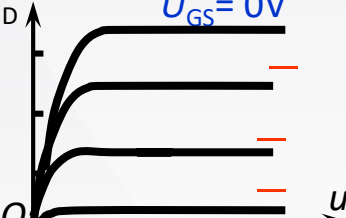
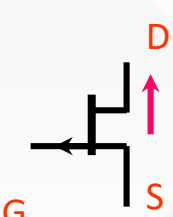
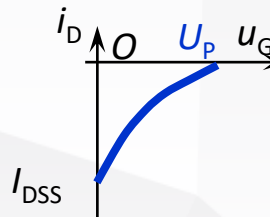

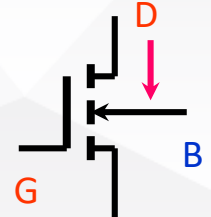
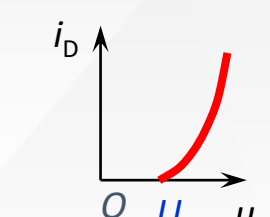
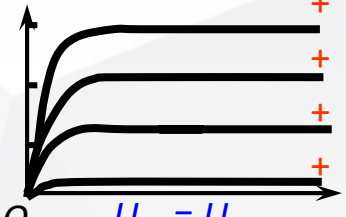


### 四、VMOS管

VMOS管漏区散热面积大,  
可制成大功率管。

# 02 半导体二极管与三极管

各类场效应管的符号和特性曲线

种类		符号	转移特性曲线	输出特性曲线
结型 N 沟道	耗尽型			
结型 P 沟道	耗尽型			
绝缘 栅型 N 沟道	增强型			

# 02 半导体二极管与三极管

种类		符号	转移特性曲线	输出特性曲线
绝缘栅型 N 沟道	耗尽型			
	增强型			
绝缘栅型 P 沟道	耗尽型			
	增强型			

### 3.7.3 场效应管的主要参数

#### 一、直流参数

##### 1. 饱和漏极电流 $I_{DSS}$

为耗尽型场效应管的一个重要参数。

##### 2. 夹断电压 $U_p$ 或 $U_{GS(off)}$

为耗尽型场效应管的一个重要参数。

##### 3. 开启电压 $U_T$ 或 $U_{GS(th)}$

为增强型场效应管的一个重要参数。

##### 4. 直流输入电阻 $R_{GS}$

输入电阻很高。结型场效应管一般在  $10^7 \Omega$  以上，绝缘栅场效应管更高，一般大于  $10^9 \Omega$ 。

### 二、交流参数

#### 1. 低频跨导 $g_m$

用以描述栅源之间的电压  $u_{GS}$  对漏极电流  $i_D$  的控制作用。

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{常数}}$$

单位：  $i_D$  毫安 (mA)；  $u_{GS}$  伏 (V)；  $g_m$  毫西门子 (mS)

#### 2. 极间电容

这是场效应管三个电极之间的等效电容，包括  $C_{gs}$ 、 $C_{gd}$ 、 $C_{ds}$ 。极间电容愈小，则管子的高频性能愈好。一般为几个皮法。



### 三、极限参数

1. 最大漏极电流  $I_{DM}$

2. 漏源击穿电压  $U_{(BR)DS}$

当漏极电流  $I_D$  急剧上升产生雪崩击穿时的  $U_{DS}$ 。

3. 漏极最大允许耗散功率  $P_{DM}$

由场效应管允许的温升决定。漏极耗散功率转化为热能使管子的温度升高。

4. 栅源击穿电压  $U_{(BR)GS}$

场效应管工作时，栅源间 PN 结处于反偏状态，若  $U_{GS} > U_{(BR)GS}$ ，PN 将被击穿，这种击穿与电容击穿的情况类似，属于破坏性击穿。

## 02 半导体二极管与三极管

### 3.7.4 场效应管与晶体管的比较

	晶体管	场效应管
结构	NPN型、PNP型  C与E一般不可倒置使用	结型耗尽型 N沟道 P沟道 绝缘栅增强型 N沟道 P沟道 绝缘栅耗尽型 N沟道 P沟道  D与S有的型号可倒置使用
载流子	多子扩散少子漂移	多子运动
输入量	电流输入	电压输入
控制	电流控制电流源 CCCS( $\beta$ )	电压控制电流源 VCCS( $g_m$ )

## 02 半导体二极管与三极管

### 晶体管

### 场效应管

噪声

较大

较小

温度特性

受温度影响较大

较小，可有零温  
度系数点

输入电阻

几十到几千欧姆

几兆欧姆以上

静电影响

不受静电影响

易受静电影响

集成工艺

不易大规模集成

适宜大规模和  
超大规模集成